

**Analyse des relations entre les ornières
et les variables écologiques dans la portion
sud de la forêt boréale québécoise**

Hors-série

Direction de la recherche forestière



**Analyse des relations entre les ornières
et les variables écologiques dans la portion
sud de la forêt boréale québécoise**

Hors-série

par

Pierre GRONDIN, ing. f.,

Jean NOËL, tech. for.

et

Alain SCHREIBER, tech. faune

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles
et de la Faune
Direction de la recherche forestière
et
Direction de l'environnement forestier
2005

Ce document est disponible sur le site Internet du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) à l'adresse suivante :

<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-activites-diversite.jsp>

Le document est une réalisation conjointe des deux directions du MRNF citées ci-dessous.

Direction de l'environnement forestier (DEF)

Ministère des Ressources naturelles
et de la Faune
880, chemin Sainte-Foy
Québec (Québec) G1S 4X4

Téléphone : (418) 627-8646
Télécopieur : (418) 643-5651

Courriel : def@mrnf.gouv.qc.ca

Direction de la recherche forestière (DRF)

Ministère des Ressources naturelles
et de la Faune
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

Téléphone : (418) 643-7994
Télécopieur : (418) 643-2165

Site Web : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche>
Courriel : recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca

DEF-0251

2005-3023

Remerciements

Plusieurs personnes ont collaboré à cette étude et nous les remercions sincèrement. Monsieur Rock Paré (DEF) a effectué la photo-interprétation des parterres de coupe en fonction de l'importance relative des ornières. Monsieur Claude Paquet (DEF) a travaillé en collaboration avec M. Jean Noël (DRF) sur divers aspects reliés à la géomatique et à l'extrapolation de la grille de vulnérabilité de l'ensemble du territoire québécois sous aménagement forestier. Monsieur Jacques Blouin (DIF) a joué un rôle important dans l'élaboration de la grille d'évaluation sur la vulnérabilité de l'orniérage. Tous ces collaborateurs ont commenté des versions préliminaires de ce document et ont ainsi contribué de façon notable à son amélioration. Enfin, M. Pierre Bélanger (DRF) a assuré la révision linguistique et Mme Sylvie Bourassa (DRF) la mise en page.

Résumé

Sur certains types de sols ou dans certaines conditions d'opération, la circulation de la machinerie forestière peut provoquer la formation d'ornières. Compte tenu des effets négatifs de ces dernières sur la productivité des sols, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) a retenu la réduction de l'orniérage comme un des objectifs de protection et de mise en valeur des ressources du milieu forestier (OPMV) qui feront partie des prochains plans généraux d'aménagement forestier (PGAF). L'approche retenue pour les OPMV permet de fixer des objectifs adaptés aux conditions écologiques régionales. Ainsi pour l'objectif de réduction de l'orniérage, le MRNF vise à fixer des cibles qui tiendront compte de la sensibilité ou de la vulnérabilité du territoire à l'orniérage.

La présente étude a comme finalité de dresser une grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage basée principalement sur les caractéristiques du sol. Pour ce faire, il est nécessaire de développer une méthode d'analyse de données sur la description d'ornières en relation avec les caractéristiques écologiques et forestières.

Cette étude porte sur 345 assiettes de coupe en majorité réparties dans la portion sud de la forêt boréale québécoise (domaine de la pessière noire à mousses). La superficie de l'ensemble de ces assiettes totalise 122 km². La photo-interprétation a été utilisée afin de segmenter ces assiettes selon trois catégories descriptives de l'importance relative en superficie des ornières : abondantes (ORN, c'est-à-dire : pour ornières abondantes), éparses (EPA) ou nulles (NUL). Les contours délimités sur les photographies aériennes ont été superposés, au moyen de la géomatique, à la cartographie écoforestière du MRNF. Cela a permis de former deux bases de données composées de 1 763 géocodes. Chacun des géocodes de la première base est décrit par rapport à la proportion relative occupée par les trois catégories d'ornières. Les géocodes de la seconde base contiennent les variables écologiques et forestières afférentes à chacun. À partir de cette information, nous avons développé une méthode permettant de définir une vulnérabilité à l'orniérage en regard de trois éléments : 1) les types de milieux physiques, 2) les types écologiques et 3) les variables forestières. De plus, nous nous sommes

intéressés à caractériser les liens entre les catégories d'ornières et les principales variables écologiques et forestières.

Les résultats obtenus montrent qu'il existe de bonnes relations entre les types de milieux physiques (ex. : les sols de drainage mésique et de texture grossière) et la proportion d'ornières, et tout particulièrement pour ce qui est de l'absence d'ornière (NUL) et des ornières abondantes (ORN). Le long d'un gradient dont les extrémités sont occupées par ces deux dernières catégories, les types de milieux physiques les mieux drainés se succèdent vers les types les plus humides. Les types de milieux physiques composant ce gradient ont été regroupés en quatre unités formées de types apparentés relativement à l'importance relative des diverses catégories d'ornières. Chacune de ces unités s'est vu attribuer une vulnérabilité à l'orniérage qui va de faible à élevée (Figures 5 à 7).

Les types écologiques livrent un message apparenté à celui des types de milieux physiques. Par contre, on remarque que, pour un même type de milieu physique, l'importance des ornières peut varier en fonction de la végétation potentielle. Par exemple, sur les sols de drainage mésique et de texture moyenne (code 2), on observe une augmentation de la catégorie « des ornières abondantes » depuis MS2 (végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc), vers RS2 (sapinière à épinette noire) puis vers RE2 (pessière à mousses). Ce phénomène est étroitement lié à une pente décroissante du terrain de la première à la troisième de ces entités. On remarque le même phénomène sur les sols de drainage subhydrique et de texture moyenne (code 5) ainsi que sur les dépôts très minces (0). Ces résultats laissent croire que le type écologique apporte une information plus précise que le type de milieu physique. Selon une autre formulation, il apparaît que le type de milieu physique doit être segmenté en fonction de la pente du terrain afin de bien rendre compte de la vulnérabilité à l'orniérage (Figures 9 à 11).

Plusieurs variables forestières se modifient également le long du gradient qui conduit des ornières abondantes vers l'absence d'ornière. Ces changements sont évidemment liés à des modifications qui surviennent dans les variables du milieu physique. Grosso modo, les peuplements résineux (pessières noires) de faible hauteur et de faible densité sont plus vulnérables à l'orniérage que les peuplements feuillus, relativement hauts et denses, ou encore que les peuplements résineux dominés ou sous-dominés par le pin gris.

Plusieurs variables forestières ou écologiques sont intimement liées à une catégorie d'ornières et peuvent être considérées comme de bons indicateurs. Ainsi, par exemple, la présence d'un ruisseau intermittent situé à moins de 20 m d'un géocode suggère que la possibilité d'y observer des ornières éparses après coupe est élevée. De plus, les végétations potentielles s'avèrent de meilleurs estimateurs des ornières

que les types de milieux physiques. Ainsi, par exemple, la végétation potentielle de la pessière noire à sphaignes (RE3) est un meilleur indicateur des ornières abondantes que les sols organiques épais (RE3).

Les connaissances acquises tout au long de l'étude, jumelées à celles de SIGOUIN (2002), ont été utilisées afin d'élaborer une grille de vulnérabilité à l'orniérage. Le type de milieu physique ainsi que la pente sont les deux variables qui structurent la clé. Au cours des prochaines années, cette clé devra être bonifiée à partir de données d'orniérage recueillies sur le terrain plutôt qu'en faisant appel à la photo-interprétation. En outre, le maximum de variables permettant d'augmenter le pouvoir prédictif des ornières, à l'exemple de la saison de récolte, devra être pris en compte.

Enfin, ce projet constitue un exemple d'utilisation de la donnée écologique et des méthodes statistiques multivariées à des fins d'aménagement forestier. Le passage de l'un à l'autre de ces domaines nécessite la collaboration réciproque des spécialistes autour d'un projet commun. Par tradition, des clés similaires à celles présentées dans cette étude faisaient surtout appel à l'expérience des forestiers. Les estimations variaient selon l'expérience de chacun d'eux. L'étude actuelle nous apparaît originale par le fait qu'elle conduit à une clé reposant sur des analyses statistiques.

Table des matières

	page
Remerciements	iii
Résumé	v
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
Introduction	1
Chapitre premier - Territoire d'étude	3
Chapitre deux - Méthode	5
2.1 Confection des fichiers d'analyses	5
2.2 Traitements statistiques	10
Chapitre trois - Résultats	15
3.1 Vulnérabilité des types de milieux physiques à l'orniérage	17
3.2 Relations entre le drainage, la pente, la texture, les dépôts de surface et l'orniérage	22
3.3 Vulnérabilité des types écologiques à l'orniérage	26
3.4 Vulnérabilité des variables descriptives du couvert forestier à l'orniérage	33
3.5 Analyse des liens entre les variables écologiques et les catégories d'ornières	38
Chapitre quatre - Grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage	47
Conclusion	55
Références bibliographiques	57

Liste des tableaux

	page
Tableau 1. Variables explicatives de l'orniérage retenues pour les traitements numériques	9
Tableau 2. Description des catégories d'ornières	16
Tableau 3. Énumération et hiérarchisation des variables explicatives par rapport à leurs liens avec les catégories d'ornières.....	42

Liste des figures

	page
Figure 1. Localisation des feuillets à l'échelle du 1 : 20 000 pour lesquels certaines assiettes de coupe ont été analysées relativement à l'orniérage	4
Figure 2. Exemple de photo-interprétation des ornières, selon trois catégories (abondantes, éparses, nulles)	6
Figure 3. Segmentation d'une assiette de coupe par les géocodes de la carte écoforestière et les diverses catégories d'ornières (abondantes, éparses, nulles). Chacun des géocodes est défini selon l'importance relative de la superficie des catégories d'ornières (A) et un ensemble de variables explicatives (B). À partir de cette information, il est possible de dresser un portrait des ornières (C)	8
Figure 4. Cheminement utilisé afin d'estimer la vulnérabilité à l'orniérage et de connaître les liens entre les catégories d'ornières et les variables explicatives	11
Figure 5. Caractérisation des types de milieux physiques et estimation de leur vulnérabilité à l'orniérage	18
Figure 6. Caractérisation des catégories d'ornières selon l'importance relative de leur superficie dans les géocodes classés en fonction des types de milieux physiques	20
Figure 7. Position des catégories d'ornières et des types de milieux physiques sur un diagramme d'ordination. Les milieux physiques sont regroupés selon leur vulnérabilité à l'orniérage	21
Figure 8. Caractérisation des variables utilisées dans la détermination des types de milieux physiques en regard des catégories d'ornières et des types de milieux physiques. La signification des symboles est donnée à la figure 5	24
Figure 9. Caractérisation des types écologiques et estimation de leur vulnérabilité à l'orniérage	28
Figure 10. Caractérisation des catégories d'ornières selon l'importance relative de leur superficie dans les géocodes, classés en fonction des types écologiques	29
Figure 11. Position des catégories d'ornières et des types écologiques sur un diagramme d'ordination. Les types écologiques sont regroupés selon leur vulnérabilité à l'orniérage	30

Figure 12. Synthèse des types de milieux physiques et des types écologiques selon leur vulnérabilité à l'orniérage et relations entre ces diverses vulnérabilités et les variables descriptives du couvert forestier	35
Figure 13. Position des catégories d'ornières et de quelques variables descriptives du couvert forestier sur un diagramme d'ordination. Les variables sont regroupées selon leur vulnérabilité à l'orniérage	36
Figure 14. Caractérisation de quelques variables forestières selon les catégories d'ornières	37
Figure 15. Position des catégories d'ornières et de quelques variables explicatives sur un diagramme d'ordination. Les variables sont regroupées selon leur vulnérabilité à l'orniérage	40
Figure 16. Position des catégories d'ornières et des 1 763 géocodes à l'étude en regard de quelques variables explicatives. Certains éléments sont mis en évidence afin de mieux comprendre la position des variables sur la figure 15	41
Figure 17. Position des catégories d'ornières et des géocodes de quelques milieux physiques faiblement liés à une catégorie d'ornières. Il s'agit essentiellement de milieux physiques possédant une distribution étalée	44
Figure 18. Position des catégories d'ornières et des géocodes correspondant au type de milieu physique sur sol mince à épais, de drainage mésique et de texture moyenne (MP2) ainsi qu'à la végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc (MS2). On note que la répartition de MP2 est beaucoup plus large que celle de MS2. Le lien NUL-MS2 est donc plus fort que celui entre NUL et MP2. Cela se répercute sur les valeurs de F présentées au tableau 3 (MS2 : 19 et MP2 : 3)	44
Figure 19. Grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage en fonction des types de milieux physiques	48
Figure 20. Importance relative des ornières selon les types écologiques (SIGOUIN 2002)	50
Figure 21. Importance relative des territoires dotés d'une faible vulnérabilité à l'orniérage	53
Figure 22. Importance relative des territoires dotés d'une vulnérabilité très élevée à l'orniérage	54

Introduction

La machinerie forestière est reconnue pour son effet perturbateur du sol lors des opérations de récolte. Le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) a d'ailleurs retenu la réduction de l'orniérage comme un des objectifs de protection et de mise en valeur des ressources du milieu forestier (OPMV) qui feront partie des prochains plans généraux d'aménagement forestier (PGAF) (MRNF 2005). Dans cette perspective, certaines compagnies ont déjà intégré la réduction de l'orniérage à la planification de leur opération de récolte. Ainsi, par exemple, le système de certification ISO 14001 d'une scierie de la Mauricie spécifie que le taux maximal d'ornières ne devrait pas excéder 6 % de la superficie de récolte (SIGOUIN 2002). Afin de réduire l'orniérage et d'atteindre les objectifs fixés par le MRNF, les forestiers ont besoin d'outils simples et peu coûteux leur permettant d'identifier les sites les plus vulnérables. Par la suite, des techniques de récolte adéquates conjuguées à une saison appropriée, devraient minimiser les perturbations.

La présente étude a pour finalité de dresser une grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage basée principalement sur les caractéristiques du sol. Pour ce faire, il est nécessaire de développer une méthode d'analyse de données sur la description d'ornières en relation avec les caractéristiques écologiques et forestières. Cette méthode devrait permettre :

- de définir un degré de vulnérabilité à l'orniérage de deux niveaux de la classification écologique, soit le type de milieu physique et le type écologique;
- d'établir des liens entre les catégories d'ornières et la végétation forestière;
- d'identifier et hiérarchiser les variables les plus fortement liées à une catégorie d'ornières;
- d'élaborer une grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage laquelle permettrait, d'une part, d'étendre les résultats obtenus à des territoires plus vastes que ceux considérés dans cette étude et, d'autre part, de cheminer vers des stratégies d'aménagement relatives à la réduction de l'orniérage.

Notre étude s'inspire de celle de SIGOUIN (2002) effectuée sur l'aire commune 043-20 (sud du réservoir Gouin) en collaboration avec Kruger Scierie Parent. Elle poursuit sensiblement les mêmes objectifs et possède la même structure. Notre projet constitue également une occasion privilégiée de travailler à la mise en valeur de la classification écologique en vigueur au MRNF. Au cours des dernières années, de nombreux efforts ont été consacrés à la mise au point de cette classification et à la cartographie des écosystèmes forestiers. Nous sommes maintenant rendus à la mise en place d'applications concrètes d'aménagement forestier aux unités écologiques. Cette étape ne pourra se concrétiser sans l'élaboration de projets autour desquels seront regroupés des membres de l'équipe de classification du MRNF et des personnes chargées de concevoir et d'appliquer des stratégies d'aménagement.

Chapitre premier

Territoire d'étude

Le territoire d'étude comprend 345 assiettes de coupe (ou aires de coupe d'un seul tenant) en majorité localisées dans le domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses (Figure 1). Ces assiettes s'étendent de Matagami au Réservoir Manicouagan et couvrent un large gradient de conditions écologiques. On observe également quelques territoires de coupe dans les domaines de la sapinière à bouleau blanc et de la sapinière à bouleau jaune. Enfin, le territoire d'étude se localise surtout dans les unités de gestion 25, 42, 43, 86, 87, 93 et 94.

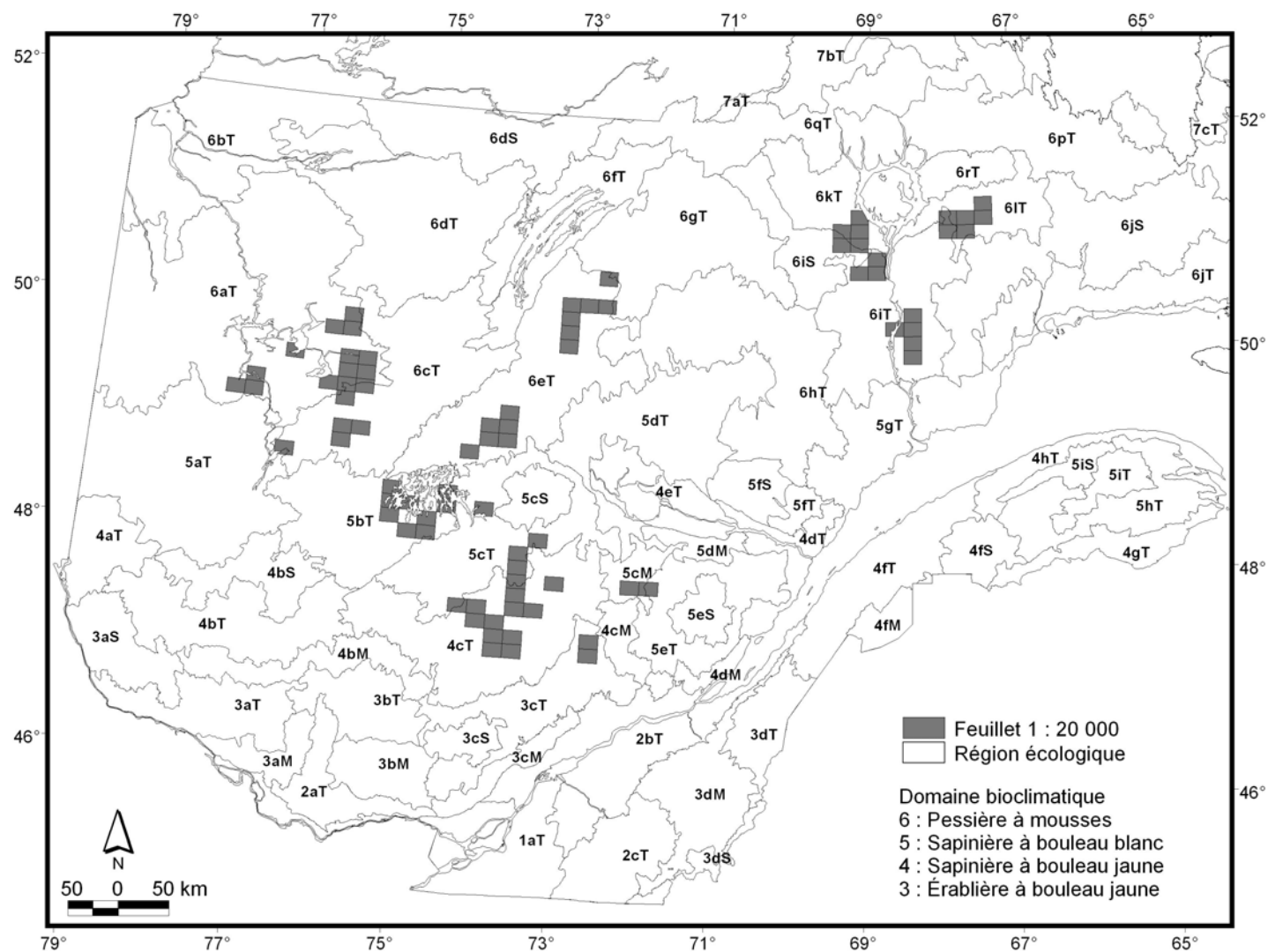


Figure 1. Localisation des feuillets à l'échelle du 1 : 20 000 pour lesquels certaines assiettes de coupe ont été analysées relativement à l'orniérage.

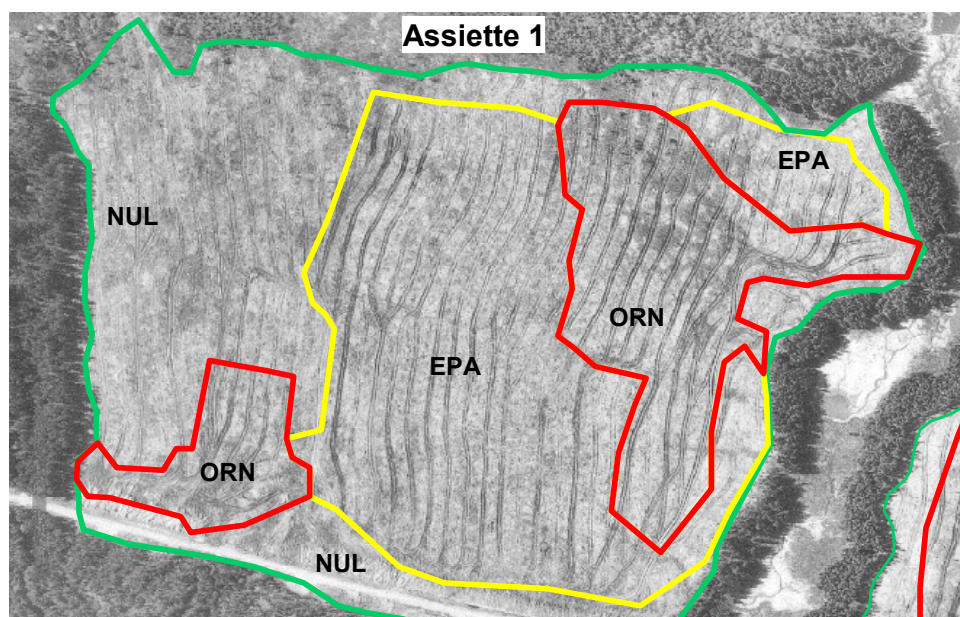
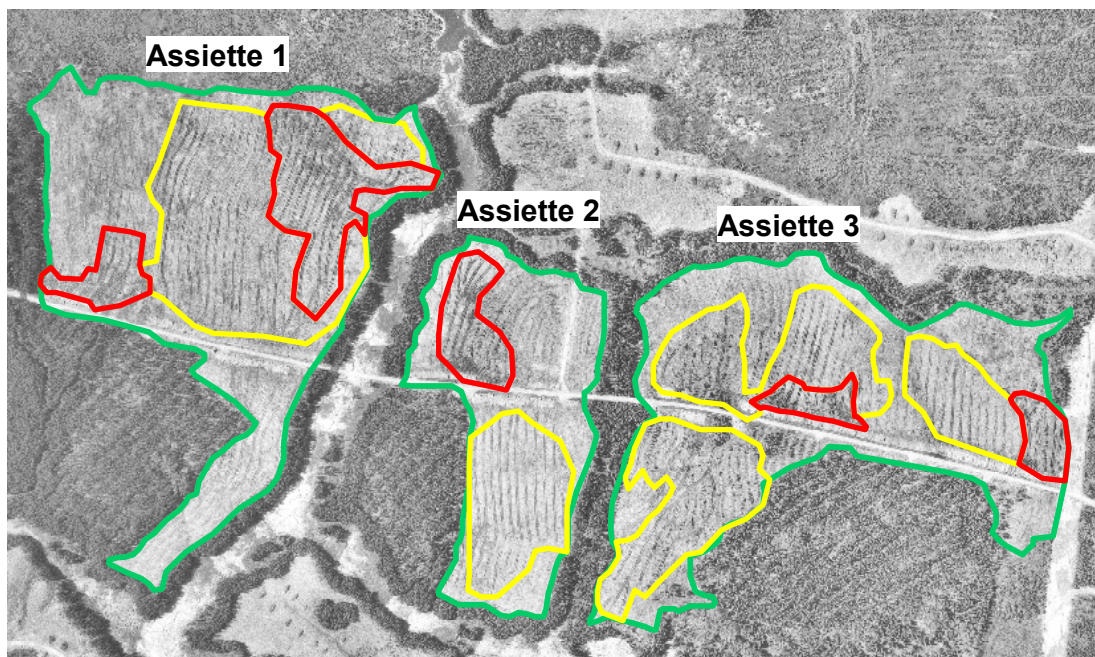
Chapitre deux

Méthode

2.1 Confection des fichiers d'analyses

L'étude a débuté par la sélection de photographies aériennes (en noir et blanc) prises à l'échelle du 1 : 15 000, peu de temps après la coupe des territoires mentionnés au chapitre précédent. Le choix des photographies a été orienté vers des secteurs bien pourvus d'ornières. Ce biais fait en sorte que cette étude répond à la question suivante : « Sur quel type de milieu physique ou type écologique retrouve-t-on les ornières lorsqu'elles sont présentes? »

Les photographies aériennes ont ensuite servi à délimiter les secteurs caractérisés par diverses catégories d'ornières (Figure 2). Les ornières sont des sillons creusés dans le sol minéral ou organique à la suite du passage de la machinerie forestière. Pour pouvoir être retenus lors de la photo-interprétation, les sillons doivent apparaître comme des traits nets et fins, plus ou moins foncés en fonction de la présence ou de l'absence d'eau dans l'ornière. Ces caractéristiques correspondent sur le terrain à une longueur d'au moins quatre mètres et à une profondeur suffisante pour perturber l'écoulement de l'eau. Sur les sols organiques, on considère que l'écoulement est perturbé lorsque le tapis végétal est déchiré. Sur les sols minéraux, la profondeur de l'ornière doit être supérieure à 20 cm, mesurée à partir de la surface du sol minéral (SCHREIBER *et al.* 2002). Trois catégories d'ornières ont été définies sur la base de l'importance relative de la superficie occupée par ces dernières. Les zones d'ornières abondantes (ORN) sont celles dont la proportion d'ornières recouvre plus de 80 % du secteur délimité. Les zones d'ornières éparses (EPA) sont celles dont la proportion d'ornières varie de 10 à 80 %. Enfin, les zones dont la proportion d'ornières est inférieure à 10 % appartiennent à la catégorie des ornières absentes (NUL).



- Ornières abondantes (ORN)** - La superficie touchée par les ornières dépasse 80 % de la superficie totale de l'unité cartographique.
- Ornières éparses (EPA)** - La superficie touchée par les ornières varie de 10 à 80 %.
- Absence d'ornièr (NUL)** - La superficie touchée par les ornières est inférieure à 10 %.

Figure 2. Exemple de photo-interprétation des ornières, selon trois catégories (abondantes, éparses, nulles).

Les contours délimités sur les photographies aériennes ont ensuite été numérisés et superposés aux cartes écoforestières du MRNF (Figure 3). Cet exercice a eu pour effet de subdiviser les géocodes délimités sur les cartes écoforestières selon diverses catégories d'orniérage (ORN, EPA, NUL). Dans certains cas, un géocode peut contenir plusieurs secteurs d'une même catégorie d'ornières, mais séparés les uns des autres par des surfaces occupées par les autres catégories. Cette information a toutefois été synthétisée dans le but de caractériser chacun des géocodes de la carte écoforestière selon l'importance relative de la superficie occupée par les trois catégories d'ornières. La sommation de ces trois catégories d'ornières totalise 100 %.

Selon la méthode utilisée par la Direction des inventaires forestiers du MRNF lors de la cartographie des écosystèmes forestiers à l'échelle du 1 : 20 000, chacun des géocodes délimités sur les cartes écoforestières est décrit dans un fichier numérique selon son couvert forestier (type, composition en essences, densité, hauteur, âge), son milieu physique (pente, dépôt de surface, drainage) et son type écologique photo-interprété. Chacun des géocodes peut également être rattaché au système de classification hiérarchique en vigueur au MRNF, notamment le district écologique, l'unité de paysage régional, la sous-région et la région écologique ainsi que le sous-domaine et le domaine bioclimatique. Cette méthode permet d'associer les géocodes, décrits précédemment, à une catégorie d'ornières ainsi qu'à un ensemble de variables forestières et écologiques, lesquelles seront utilisées lors des traitements statistiques (Figures 3A et 3B). Nous avons ajouté aux variables déjà présentes dans les fichiers de données, la distance séparant le centre de chacun des géocodes contenus dans une assiette de coupe et le ruisseau intermittent (RI) situé le plus près. Ce dernier ajout a été exécuté à l'aide du logiciel de géomatique ArcView. Par exemple, lorsqu'un ruisseau est situé à moins de 20 m du centre d'une unité cartographique, le descripteur RI20 lui est attribué. La procédure s'est poursuivie jusqu'à une distance de 80 m (RI80).

Le contenu des fichiers dans lesquels sont décrits les géocodes a été validé. Les géocodes qui n'étaient pas décrits en regard de certaines variables, ou qui contenaient une information erronée, ont été retirés de la base de données. Cette étape a conduit à la reconnaissance de 1 763 géocodes répartis à l'intérieur de 345 assiettes de coupe. De plus, une synthèse de l'information relative à chacune des variables à l'étude a été effectuée afin de diminuer le nombre de catégories. Les unités les plus faiblement représentées ont été regroupées avec les unités dominantes pour lesquelles les affinités étaient les plus fortes. Par exemple, les nombreux groupements d'essence de départ (PgE, EPg...) ont été regroupés en neuf groupements d'essence synthèses (Tableau 1).

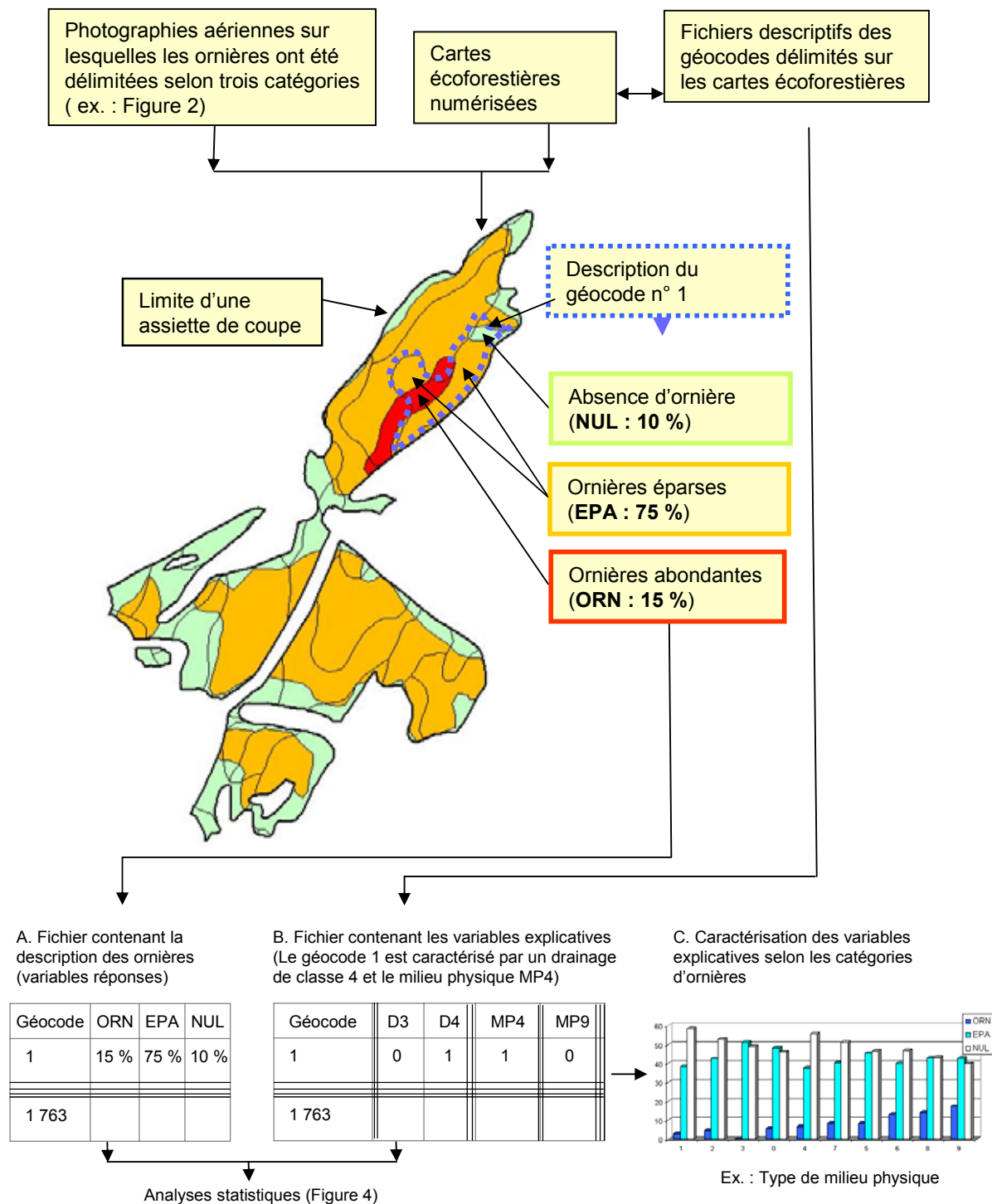


Figure 3. Segmentation d'une assiette de coupe par les géocodes de la carte écoforestière et les diverses catégories d'ornières (abondantes, éparses, nulles). Chacun des géocodes est défini selon l'importance relative de la superficie des catégories d'ornières (A) et un ensemble de variables explicatives (B). À partir de cette information, il est possible de dresser un portrait des ornières (C).

Tableau 1. Variables explicatives de l'orniérage retenues pour les traitements numériques

Thème	Type de variable	Variables	Signification des symboles
Milieu physique	Semi-quantitative	MP0, MP1, MP2, MP3, MP4, MP5, MP6, MP7, MP8, MP9	Figure 5
Drainage*	Semi-quantitative	1 (00, 10, 16), 2 (20), 3 (21, 30), 4 (31, 40), 5 (41, 50), 6 (51, 60, 61)	Figure 5
Pente	Semi-quantitative	A, B, C, D, E, F	Figure 5
Texture	Qualitative	O (organique), F, M, G, R (roc)	Figure 5
Dépôt de surface*	Qualitative	1A, 1AY (1AM, 1AY), 1B (1BD, 1BG, 1BP), 23 (2A, 2AE, 2BE, 3AN), 4GA (4A, 4GA), 4GS (4GS, 9S), 7E, 7T (7T, 7TY), R (R, R1A, R7T)	Figure 5
Type écologique*	Qualitative	ME16 (ME13), MJ12 (FE32, MJ12, MS12, MS62), MS22, MS26 (MS23), RE20 (RE10), RE21 (RE11, RE24, RS21), RE22 (RE12, RE2A), RE25 (RE2B), RE26 (RS26), RE37 (RS37), RE38 (RS38), RE39, RS20 (MS20, MS21), RS22 (RS2A), RS25 (MJ25, MS25, RS2B) et codes de terrain (AL, DH, DS)	Figure 9
Végétation potentielle*	Qualitative	MJ1 (FE3, MJ1, MS1, MS6), ME1, MJ2, MS2, RE1, RE2, RE3 (RE3, RS3) RS2 et code de terrain (AL, DH, DS)	Figures 9 et 18
Distance d'un ruisseau intermittent	Quantitative	RI20 (20 m), RI40 (40 m), RI60 (60 m), RI80 (80 m)	Figure 15
Type de couvert	Qualitative	F, M, R	Figure 12
Groupe d'essence*	Qualitative	FEU (BB1, BBBB, BBPE, BJ, ERBJ, PEBB, PEPE), BBR (BB1R, BB1S, BBBBE, BBBBPG, BBBBR, BBBBS, BBPEE, BBPEPG, BBPER, BBPES, BJ-R), PER (PEBBE, PEBBPG, PEBBR, PEBBS, PEPEE, PEPEPG, PEPER, PEPES), PGF (PGBB, PGFI, PGPE), EE (EE, EME, RE), EPG (EPG, PGE), PG (PGPG), ES (ES, SE, SS)	Figure 12
Densité du couvert	Semi-quantitative	A, B, C, D	Figure 12
Hauteur du couvert	Semi-quantitative	1, 2, 3, 4, 5, 6	Figure 12
Âge du couvert*	Qualitative	0010 , (10), 3050 (30, 50, JIN), 70, 90 (90, 9030, 9050), 120 (120, 12030, 12050, 12070, 50120, 70120), VIN	Figure 12

* Synthèse

2.2 Traitements statistiques

Les traitements statistiques ont été effectués sur les deux fichiers présentés à l'étape précédente (Figures 3A et 3B). Le premier fichier montre l'importance relative des catégories d'ornières (ORN, EPA, NUL) présentes dans chacun des géocodes. Il correspond au fichier des variables réponses (Figure 3A). Le second contient la description écologique et forestière de chacun des géocodes. En termes statistiques, il s'agit du fichier des variables explicatives (Figure 3B, Tableau 1). Dans ce second fichier, les variables explicatives ont été codées selon un mode binaire. Par exemple, les géocodes caractérisés par un dépôt d'argile (4GA) sont décrits par le chiffre « 1 » alors que tous les autres types de dépôts sont qualifiés du nombre « 0 ». Afin de se familiariser avec les bases de données et d'établir des liens préliminaires entre les catégories d'ornières (variables réponses) et les variables explicatives, des histogrammes portant sur la majorité des thèmes à l'étude ont été tracés (Figure 3C). Plusieurs de ces histogrammes sont intégrés au présent document (Figures 6, 8, 10 et 14).

Les traitements statistiques visent surtout à établir des relations entre les diverses catégories d'ornières (variables réponses) et les variables forestières et écologiques (variables explicatives). Par exemple, les sols sillonnés des plus importantes densités d'ornières (catégorie ORN) sont étroitement liés aux pentes de classe A. Le type d'analyse qui permet d'atteindre un tel objectif se nomme « Analyse de redondance canonique (RDA) » (LEGENDRE et LEGENDRE 1998). La base de cette analyse repose sur un ensemble de régressions polynomiales effectuées entre chacune des variables réponses et un ensemble de variables explicatives. Les analyses ont été faites à l'aide du logiciel CANOCO 4.5 (TER BRAAK et SMILAUER 2002). Plus précisément, les analyses ont porté sur trois combinaisons de fichiers.

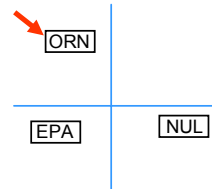
1. Les catégories d'ornières contre les types de milieux physiques
2. Les catégories d'ornières contre les types écologiques
3. Les catégories d'ornières contre les variables forestières

Peu importe la combinaison retenue (1, 2 ou 3), les résultats sont livrés sur un ensemble de diagrammes, nommés « Diagrammes d'ordination ». Plus spécifiquement, un diagramme d'ordination est une figure sur laquelle différents objets, soit des variables descriptives (ORN, EPA, NUL), soit des variables explicatives (ex. : MP9) ou soit des géocodes, sont positionnés selon leurs coordonnées respectives par rapport à un système d'axes qui optimise leur représentation face aux gradients écologiques à l'étude.

Un premier diagramme d'ordination montre la position des variables réponses (les catégories d'ornières, Figure 4.1A) alors qu'un second présente les variables explicatives (Figure 4.1B). C'est en comparant les diagrammes d'ordination que les liens entre les variables réponses et les variables explicatives se créent.

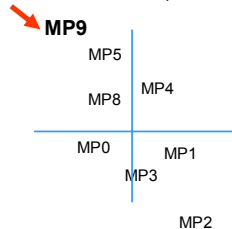
4.1 La vulnérabilité à l'orniérage. Exemple des types de milieux physiques

A. Diagramme d'ordination des catégories d'ornières

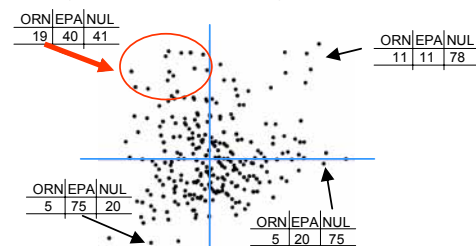


ORN : Ornières abondantes
EPA : Ornières éparées
NUL : Absence d'ornièr

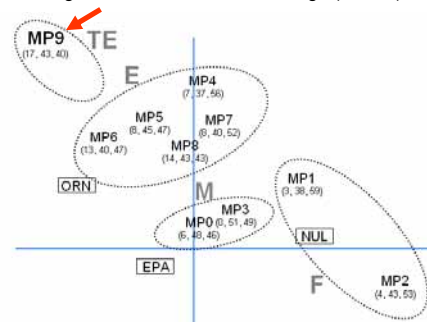
B. Diagramme d'ordination des variables explicatives



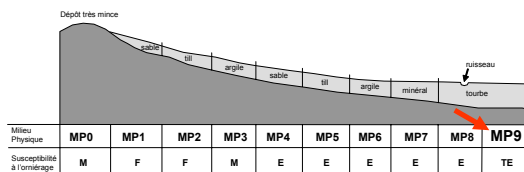
C. Diagramme d'ordination des géocodes forestiers



D. Regroupement des variables explicatives et détermination du degré de vulnérabilité à l'orniérage (F à TE)

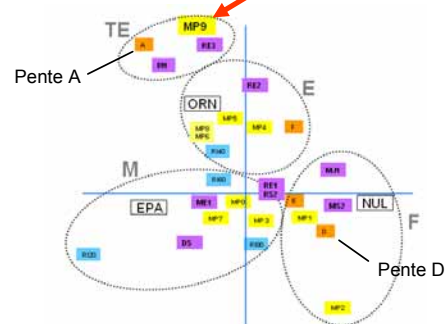


E. Présentation des résultats

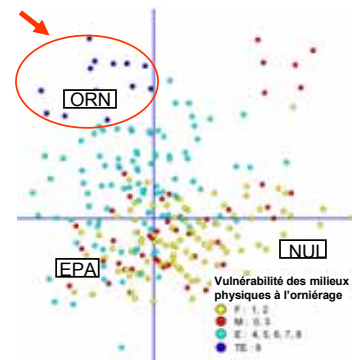


4.2 Les liens entre les catégories d'ornières et les variables explicatives

A. Ordination des variables explicatives (milieux physiques et autres, regroupés selon la méthode présentée en 4.1D)



B. Analyse des liens entre les variables explicatives et les géocodes. Les géocodes appartenant à MP9 sont tous éloignés du centre de l'ordination. Cela confirme le lien étroit ORN-MP9



C. Le lien étroit entre ORN-MP9 se traduit par une valeur de F relativement élevée et un seuil observé (p value) inférieur à 0,05 pour la variable MP9

Code	Variable	P*	F**
R20	Ruisseau intermittent (0 à 20 m)	0.002	70.63
A	Pente (A)	0.002	30.40
RE3	Pessière noire à sphaignes	0.002	25.94
DH1	Dénué humide	0.002	22.59
MS2	Sapinière à bouleau blanc	0.002	19.24
MJ1	Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre	0.002	15.89
DS	Dénué sec	0.002	9.39
F	Pente (F)	0.002	7.13
R40	Ruisseau intermittent (20 à 40 m)	0.008	7.16
D	Pente (D)	0.008	6.71
R60	Ruisseau intermittent (40 à 60 m)	0.008	6.23
MP9	Type de milieu physique (9)	0.010	5.80
MP2	Type de milieu physique (2)	0.014	3.97
RE2	Pessière noire à mousses ou à éricacées	0.018	5.07
MP5	Type de milieu physique (5)	0.020	4.52
E	Pente (E)	0.024	4.19
R80	Ruisseau intermittent (60 à 80 m)	0.038	3.55

D. Élaboration d'une grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage

Figure 4. Cheminement utilisé afin d'estimer la vulnérabilité à l'orniérage et de connaître les liens entre les catégories d'ornières et les variables explicatives.

Par exemple, la catégorie des ornières abondantes (ORN) est observée sur une position similaire au milieu physique 9 (MP9, sols organiques épais), ce qui confirme le lien entre ces deux variables. De plus, les géocodes dominés par MP9 se localisent dans la même portion du diagramme d'ordination que ORN et MP9 (Figure 4.1C). Dans ces derniers géocodes, la proportion relative moyenne de la superficie des parterres de coupes sillonnée d'ornières abondantes (ORN, Figure 2) est de 19 %, comparée à 40 % pour les ornières éparses (EPA) et 41 % pour l'absence d'ornières (NUL-41 %).

Il est souvent utile, dans un but de synthétiser les résultats, de former des groupes de variables explicatives. Pour ce faire, on utilise un programme qui permet de créer des groupes à partir des mêmes coordonnées que celles utilisées pour le positionnement des variables sur les diagrammes d'ordination. Le programme K-means de LEGENDRE (2001) a servi à définir les groupes retenus dans cette étude. Par exemple, la majorité des types de milieux physiques subhydriques et hydriques sont regroupés dans une entité (MP4-MP5-MP6-MP7-MP8). Par contre, le milieu physique des sols organiques épais (MP9), si différent de ceux précités, est isolé dans la partie supérieure gauche du diagramme d'ordination (Figure 4D). Les groupes formés sont ensuite qualifiés selon leur vulnérabilité à l'orniérage, laquelle va de faible à très élevée (Figure 4D). Ainsi, la vulnérabilité à l'orniérage des sols organiques épais (MP9) est élevée. On définit la vulnérabilité à l'orniérage comme la probabilité qu'un sol puisse être propice à la création d'ornières à la suite du passage de la machinerie forestière, en raison de caractéristiques particulières afférentes à son drainage et à sa texture (type de milieu physique). Les estimations de la vulnérabilité peuvent provenir de diverses sources, depuis l'expérience d'un forestier jusqu'à un protocole scientifique. Dans le cadre de ce projet, elles découlent d'analyses statistiques (Figure 4). Les résultats relatifs à la vulnérabilité à l'orniérage peuvent être illustrés de diverses façons; nous avons choisi diverses représentations visuelles. La première s'apparente à celle d'une toposéquence (Figure 4.1E). La seconde se présente sous la forme d'une grille d'évaluation à la vulnérabilité à l'orniérage (Figures 4.2D et 19).

Une démarche similaire à celle présentée pour les types de milieux physiques (Figures 4.1A à 4.1E) peut être appliquée à l'ensemble des variables explicatives à l'étude. Un tel cheminement permet de connaître les liens entre l'un des thèmes à l'étude (ex. : les types de milieux physiques) et les autres variables descriptives. Par exemple, il existe de forts liens entre les sols organiques épais (MP9) et les pentes faibles (classe A) (Figure 4.2A). D'autres variables sont liées aux autres types de milieux physiques, à l'exemple des tills épais et de drainage moyen (MP2) et les pentes de classe D (Figure 4.2B). Ainsi, ce dernier diagramme d'ordination (Figure 4.2B) vient illustrer l'ensemble des relations entre les types de milieux physiques et les diverses variables descriptives des ornières. En d'autres termes, l'analyse des figures 4.2A et 4.2B permet de comprendre le gradient écologique qui décrit le passage de sols de la catégorie de faible pourcentage d'ornières (NUL) à celle d'un fort pourcentage d'ornières (ORN).

Le logiciel utilisé (CANOCO) permet également de connaître les variables explicatives les plus fortement associées statistiquement à une catégorie d'ornières. Plus une variable est éloignée du centre du diagramme d'ordination, plus forte est sa liaison avec une catégorie spécifique d'ornières (Figure 4.2A). Par exemple, la position éloignée du milieu physique MP9 et sa proximité de la catégorie des ornières abondantes (ORN) confirment le lien entre ces deux éléments. La figure 4.2B montre que tous les géocodes appartenant à MP9 sont éloignés du centre de l'ordination. Devant une si étroite relation, il est logique de retrouver MP9 parmi les variables les plus fortement liées à une catégorie d'ornières. Cette variable occupe le douzième rang des variables les plus significatives dans la création d'ornières, à un seuil $< 0,05$ (Figure 4.2C). La valeur de F, calculée selon la formule présentée par LEGENDRE et LEGENDRE (1998), se chiffre à 5,80 (Figure 4.2C). Enfin, il est possible de synthétiser l'information de la figure 4.2C de façon à mettre en évidence l'ensemble des variables associées à chacune des catégories d'ornières (Tableau 3). C'est ainsi, par exemple, que huit variables sont fortement liées aux ornières abondantes (ex. : pentes de classe A).

En conclusion, les analyses statistiques effectuées sur les données d'orniérage serviront à améliorer nos connaissances en regard :

- 1) des liens entre les diverses catégories d'ornières (ORN, EPA, NUL) et les variables explicatives (ex. : les types de milieux physiques);
- 2) des gradients écologiques le long desquels se répartissent les diverses catégories d'ornières, à l'exemple du gradient de la pente (de A vers F, Figure 4.2A) ou du type de milieu physique (Figure 4.2B);
- 3) de l'importance des variables explicatives dans le développement des diverses catégories d'ornières, à l'exemple de l'importance des sols organiques épais (MP9) dans la création de parterres de coupe marqués d'ornières abondantes (Figure 4.2C).

Chapitre trois

Résultats

Les résultats sont présentés selon cinq modules. Dans le premier, la présentation est orientée dans le but de caractériser chacun des types de milieux physiques selon une vulnérabilité à l'orniérage. Le second module est un supplément d'informations au premier. On y commente les relations entre les diverses variables retenues dans les types de milieu physique (ex. : le drainage) et les catégories d'ornières (ORN, EPA, NUL). Le troisième module suit le même processus que le premier, mais il porte sur le type écologique plutôt que sur le type de milieu physique. Il devient alors intéressant de comparer les résultats obtenus selon les deux approches; la première approche (type de milieu physique) ne cible que les variables pédologiques alors que la seconde (type écologique) intègre les variables pédologiques ainsi que la dynamique forestière (par le biais de la végétation potentielle). Le quatrième module présente une démarche similaire aux volets précédents mais il porte sur les variables forestières. Enfin, le cinquième module a comme objectif d'individualiser et de hiérarchiser les variables les plus fortement associées aux diverses catégories d'ornières.

Tous ces résultats découlent de la méthode d'analyse schématisée aux figures 3 et 4, laquelle repose sur deux fichiers de données. Le premier fichier donne l'importance relative des trois catégories d'ornières (abondantes, éparses, nulles), réparties dans les 1 763 géocodes à l'étude. Le second contient les variables explicatives des ornières pour ces mêmes géocodes (Tableau 1). Des statistiques descriptives des trois catégories d'ornières sont présentées au tableau 2. Celui-ci montre, notamment, que sur les 122 km² de superficie de coupe étudiés, la moitié est couverte d'ornières. Parmi les superficies touchées, seulement 6 % sont recouvertes d'ornières abondantes (ORN), comparativement à 44 % pour les ornières éparses (EPA). Les ornières abondantes s'observent dans seulement 27 % des 1 763 géocodes

Tableau 2. Description des catégories d'ornières

A) Représentativité des trois catégories d'ornières sur le territoire d'étude

	ORN	EPA	NUL	
Superficie (km ²)	7,6	52,9	61,5	122,0
Superficie (%)	6,2	43,4	50,4	100,0

(ORN : ornières abondantes, EPA : ornières éparses, NUL : absence d'ornière)

B) Caractérisation des ornières abondantes (ORN) selon diverses classes de recouvrement parmi les

1 763 géocodes à l'étude

rec. des ornières (%)	frq	%	superficie km ²	%
0	1291	73	0,00	0
1 à 5	119	7	0,21	3
6 à 10	66	4	0,45	6
11 à 20	90	5	1,56	21
21 à 40	92	5	2,26	30
41 à 60	45	3	1,22	16
61 et plus	60	3	1,88	25
	1 763	100	7,58	100

C) Caractérisation des ornières éparses (EPA) selon diverses classes de recouvrement parmi les

1 763 géocodes à l'étude

rec. des ornières (%)	frq	%	superficie km ²	%
0	119	7	0,00	0
1 à 5	128	7	0,12	0
6 à 10	92	5	0,41	1
11 à 20	189	11	1,76	3
21 à 40	398	23	8,85	17
41 à 60	365	21	14,44	27
61 et plus	472	27	27,40	52
	1 763	100	52,98	100

D) Caractérisation des superficies sans ornière (NUL)

selon diverses classes de recouvrement parmi les

1 763 géocodes à l'étude

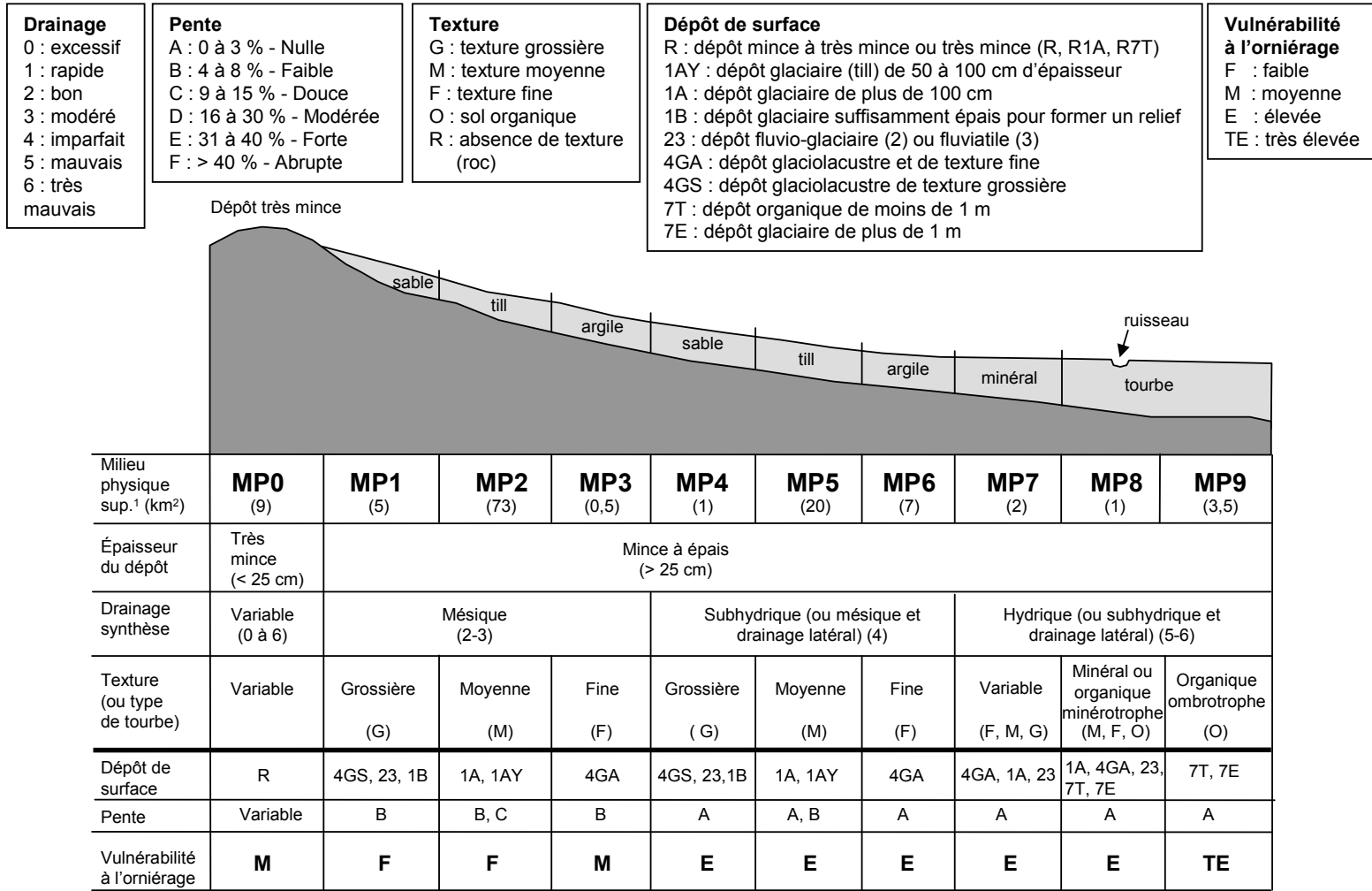
rec. des ornières (%)	frq	%	superficie km ²	%
0	17	1	0,00	0
1 à 5	49	3	0,06	0
6 à 10	60	3	0,36	1
11 à 20	148	8	1,60	3
21 à 40	337	19	8,39	16
41 à 60	368	21	14,09	27
61 et plus	784	44	36,99	70
	1 763	100	61,49	116

étudiés (Tableau 2B). Lorsque ces dernières sont présentes, la superficie qu'elles couvrent dans un géocode est fort variable (de 1 à plus de 60 %). Sur les 7,6 km² occupés par des ornières abondantes, 2,2 km² s'observent à l'intérieur de géocodes dans lesquels les ornières abondantes varient de 21 à 40 % de la superficie totale. Les ornières éparses sont beaucoup plus fréquentes que les précédentes. On les note dans 93 % des géocodes (Tableau 2C). La majorité de ces géocodes sont recouverts par une superficie d'ornières éparses supérieure à 20 %. Enfin, presque tous les géocodes (99 %) possèdent un secteur dans lequel les ornières sont absentes (Tableau 2D). Tout comme pour les ornières éparses, l'importance relative de la superficie sans orniérage dans les géocodes est variable, mais généralement supérieure à 20 %.

3.1 Vulnérabilité des types de milieux physiques à l'orniérage

Cette section présente les relations entre les « types de milieux physiques » et les perturbations dont ils font l'objet lors de la coupe forestière. La notion de type de milieu physique est fréquemment utilisée dans la classification écologique au MRNF. Elle permet de caractériser le sol selon son épaisseur, son drainage et sa texture (Figure 5) en faisant appel à un nombre limité de classes. Un total de dix types de milieux physiques sont utilisés (MP0 à MP9). Le premier d'entre eux caractérise les sols très minces (MP0). Les trois suivants (MP1, MP2, MP3) dissocient les sols minces à épais et de drainage mésique selon leur texture (sable, till, argile). Les types suivants (MP4, MP5, MP6) répètent la même séquence pour les sols subhydriques, c'est-à-dire ceux saturés d'eau durant une période suffisamment longue pour provoquer la formation de mouchetures d'oxydation à une profondeur inférieure à 50 cm. Enfin, les trois derniers types décrivent les sols hydriques. Les milieux physiques 7 et 9 caractérisent les sols hydriques « relativement pauvres » ou ombrotrophes puisqu'ils sont alimentés surtout par les eaux de pluie. Le milieu 7 isole les sols minéraux, la tourbe y est peu épaisse (moins de 60 cm). Le milieu 9 est associé aux tourbes épaisses. Enfin, le milieu 8 regroupe les milieux « relativement riches » ou minérotrophes; ce sont ceux alimentés autant par les eaux de pluie que par les eaux de ruissellement. La richesse des sols hydriques minérotrophes est révélée par la présence de plusieurs espèces végétales parmi lesquelles l'aulne rugueux demeure la plus fidèle et la plus abondante. Pour en savoir davantage sur les caractéristiques des milieux physiques, le lecteur peut consulter les guides de reconnaissance des types écologiques, à l'exemple de celui des régions écologiques 5b, 5c et 5d (BLOUIN et BERGER 2000).

On peut noter que chacun des types de milieux physiques regroupe plusieurs types de dépôts de surface (Figure 5). Par exemple, tous les dépôts sableux, quelle que soit leur origine (glaciolacustre, fluvio-glaciaire, fluviale), sont regroupés dans les types de milieux physiques 1 (sable mésique), 4 (sable subhydrique) ou 7 et 8 (sable hydrique). Enfin, les types de milieux physiques prennent en compte la



1. Superficie ayant fait l'objet d'une photo-interprétation afférente aux catégories d'ornières (ORN, EPA, NUL) (total : 122 km²).

Figure 5. Caractérisation des types de milieux physiques et estimation de leur vulnérabilité à l'orniérage.

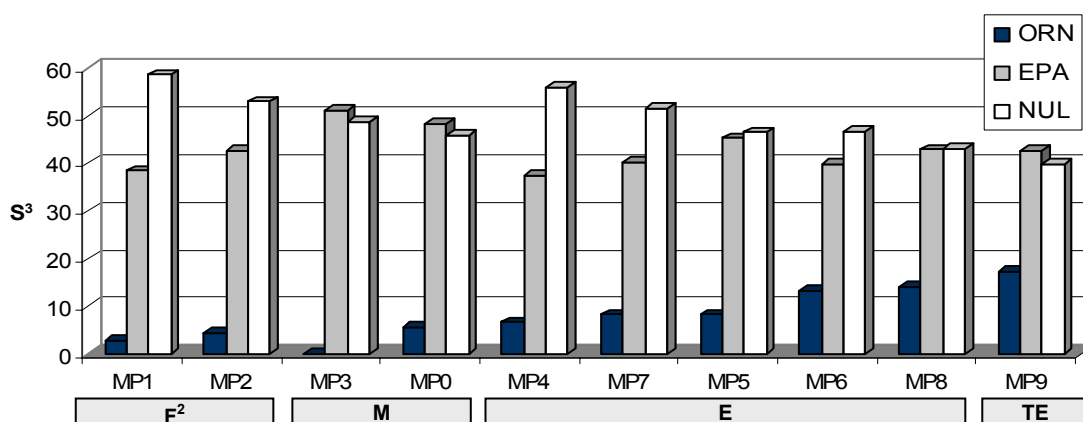
pente en raison des liens étroits qui unissent cette dernière variable et le drainage. Par exemple, les pentes faibles (A) et les drainages subhydriques et hydriques sont deux classes de variable fortement liées. Le type de milieu physique ne constitue pas un niveau de perception du système hiérarchique de classification écologique en vigueur au MRNF (MRN 2001). Par contre, il est intégré au type écologique pour lequel on consacre la section 3.3 du présent document. Les relations entre les types de milieux physiques et les ornières sont présentées aux figures 6 et 7. De ces dernières, il se dégage les constats suivants :

A. Les ornières abondantes (ORN) se rencontrent essentiellement sur les sols subhydriques (MP4, MP5, MP6) ainsi que sur les sols hydriques (MP7, MP8, MP9). Elles recouvrent plus de 6 % de la superficie sur les sols subhydriques et sur les sols hydriques. À l'opposé, elles recouvrent moins de 6 % de la superficie sur les sols mésiques (MP1, MP2, MP3) et sur les sols très minces (MP0). Les ornières abondantes demeurent cependant bien représentées sur ce dernier type de substrat (5,7 %), caractérisé par une grande diversité de classes de drainage (excessif à imparfait, Figure 8A2) et de classes de pente (B à F, Figure 8B2). Sur les sols subhydriques, les ornières denses ne cessent de gagner en superficie depuis les sols sableux (MP4), vers les tills (MP5) puis vers les sols argileux (MP6). Une gradation est observée également sur les sols hydriques, notamment à partir des sols minéraux (MP7) vers les sols organiques minérotrophes (avec circulation d'eau, MP8) puis vers les sols organiques ombrotrophes (sans circulation d'eau, MP9). Enfin, la proportion d'ornières abondantes est similaire (8 %) sur les sols subhydriques de texture moyenne (MP5) et sur les sols hydriques pour lesquels la tourbe n'est pas suffisamment épaisse pour satisfaire les exigences des sols organiques (MP7).

B. La superficie occupée par les ornières éparses (EPA) est beaucoup plus importante que celle des ornières abondantes. Les ornières éparses excèdent 35 % de la superficie sur tous les types de milieux physiques. C'est cependant sur les sols très minces (MP0) ainsi que sur les textures fines de drainage moyen (MP3) qu'elles sont les plus fréquentes (plus de 45 %). À l'inverse, les sables mésiques ou subhydriques (MP1, MP4) constituent les milieux physiques les moins perturbés par les ornières éparses.

C. Dans plusieurs types de milieux physiques, les superficies pour lesquelles les ornières sont absentes (NUL) sont du même ordre d'importance que celles des ornières éparses (EPA). Cette affirmation se vérifie autant sur les types de milieux physiques mésiques (MP3), sur les sols très minces (MP0) que sur les tills de drainage subhydrique (MP5) ou hydrique (MP8, MP9). En outre, la proportion des superficies exemptes d'ornières est nettement supérieure à celle des ornières éparses sur trois types de milieu physique. Il s'agit de deux types sur sable (MP1, MP4) de même que MP2. Les sols hydriques sur sol minéral (MP7) possèdent également d'importantes superficies sans ornière. On pose l'hypothèse que les coupes pratiquées durant la saison hivernale auraient eu pour effet de moins perturber le sol de ce milieu

Milieu physique ¹	ORN (%)	EPA (%)	NUL (%)	Vulnérabilité à l'orniérage ²
MP1	2,98	38,45	58,56	Faible (F)
MP2	4,55	42,60	52,85	
MP3	0,00	51,20	48,80	Moyenne (M)
MP0	5,73	48,29	45,97	
MP4	6,64	37,56	55,81	Élevée (E)
MP7	8,32	40,31	51,37	
MP5	8,27	45,3	46,43	
MP6	13,21	39,97	46,81	
MP8	14,07	42,91	43,02	
MP9	17,43	42,66	39,90	



1. Milieux physiques présentés à la figure 5
 2. Vulnérabilité à l'orniérage déterminée à la figure 7
 3. Importance relative en superficie des catégories d'ornières définies dans les géocodes
- Catégories d'ornières : ORN : Ornières abondantes, EPA : Ornières éparées, NUL : Absence d'ornière

MP0 : Dépôt très mince, de drainage et de texture variables
MP1 : Dépôt mince à épais, de drainage mésique et de texture grossière
MP2 : Dépôt mince à épais, de drainage mésique et de texture moyenne
MP3 : Dépôt mince à épais, de drainage mésique et de texture fine
MP4 : Dépôt mince à épais, de drainage subhydrique et de texture grossière
MP5 : Dépôt mince à épais, de drainage subhydrique et de texture moyenne
MP6 : Dépôt mince à épais, de drainage subhydrique et de texture fine
MP7 : Dépôt mince à épais, de drainage hydrique et de régime nutritif ombrotrophe
MP8 : Dépôt minéral ou organique, de drainage hydrique et de régime nutritif minérotrophe
MP9 : Dépôt organique mince ou épais, de drainage hydrique et de régime nutritif ombrotrophe

Figure 6. Caractérisation des catégories d'ornières selon l'importance relative de leur superficie dans les géocodes classés en fonction des types de milieux physiques.

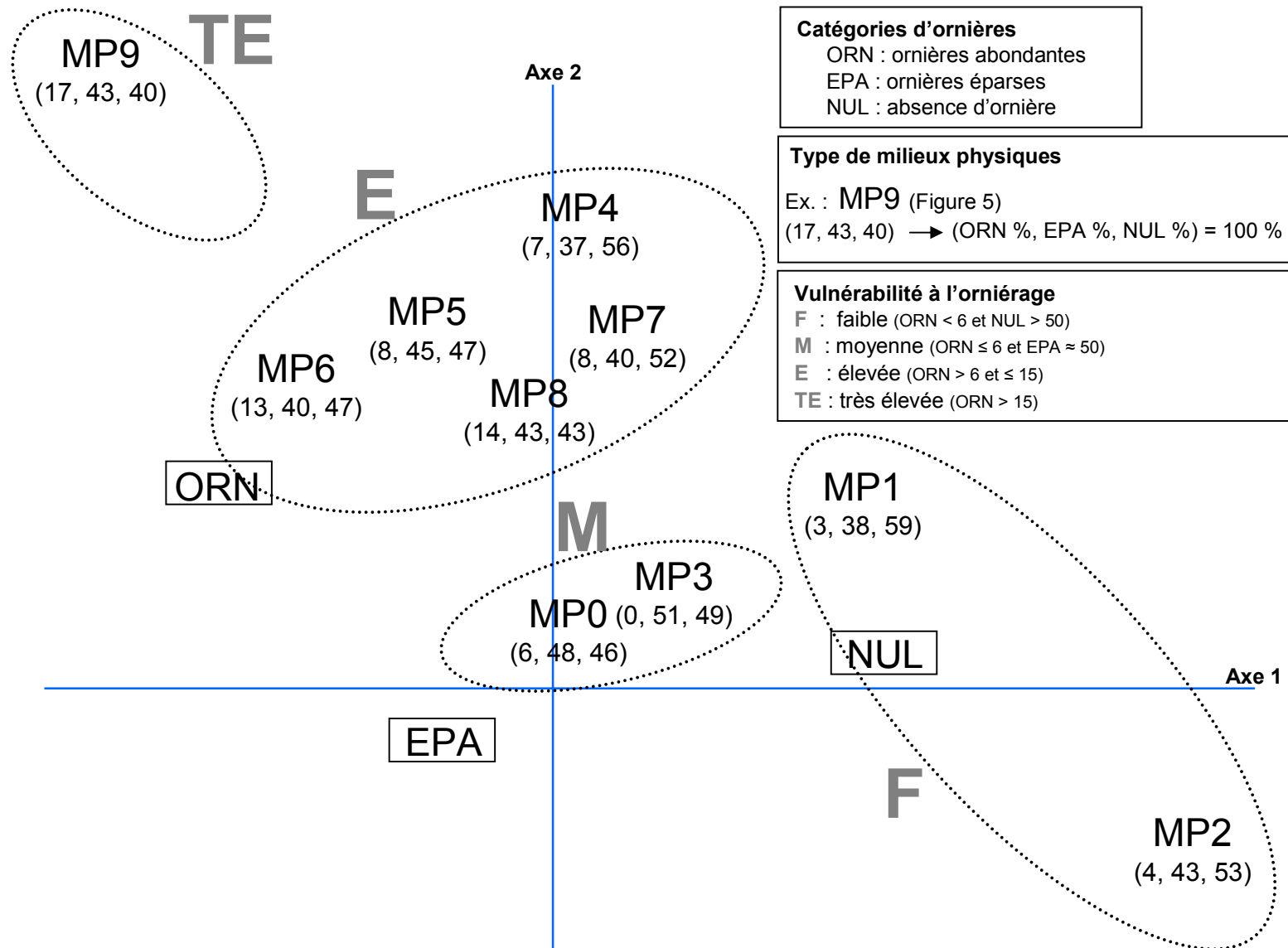


Figure 7. Position des catégories d'ornières et des types de milieux physiques sur un diagramme d'ordination. Les milieux physiques sont regroupés selon leur vulnérabilité à l'orniérage.

que les autres milieux physiques hydriques (MP8, MP9). La nature du dépôt MP7 joue également un rôle important. La figure 8D2 montre qu'il s'agit majoritairement de till (1A). Le portrait pourrait être différent si le dépôt se composait surtout d'argile (4GA). On verra ultérieurement que les résultats obtenus par SIGOUIN (2002) correspondent davantage à ceux auxquels nous nous serions attendus, soit une plus forte proportion d'ornières abondantes sur le milieu physique MP7 (RE37, Figure 20).

D. Les analyses numériques (Figure 7) permettent de connaître comment les diverses catégories d'ornières se positionnent les unes par rapport aux autres (Figure 7). On note tout d'abord une certaine opposition de la catégorie des ornières abondantes (ORN) par rapport à la catégorie des ornières absentes (NUL). C'est d'ailleurs le long de ce gradient que s'échelonnent les divers types de milieux physiques. Les ornières éparses se situent légèrement en retrait des deux autres catégories, ce qui révèle leur faible pouvoir de discrimination sur les unités de classification, lesquelles sont ici les types de milieux physiques. En d'autres termes, si les ornières éparses avaient un fort pouvoir de discriminer les unités écologiques, cette catégorie (EPA) se serait positionnée beaucoup plus à gauche de l'ordination de la figure 7.

E. Les analyses de groupements réalisées sur les types de milieux physiques (soit plus précisément sur leurs coordonnées) ont mené à la délimitation de quatre entités. Une vulnérabilité à l'orniérage a été attribuée à chacune d'elle. La première entité (vulnérabilité très élevée) caractérise les sols hydriques ombrotrophes (MP9); les ornières abondantes y recouvrent plus de 15 % de la superficie. La deuxième entité (vulnérabilité élevée) regroupe les sols subhydriques (MP4, MP5, MP6) ainsi que les sols hydriques MP7 et MP8. La troisième entité (vulnérabilité moyenne) caractérise les dépôts fins de drainage mésique (MP3) ainsi que les sols très minces (MP0). Rappelons que ces deux derniers types de milieux physiques se démarquent par les importantes superficies sillonnées d'ornières éparses. Enfin, la dernière entité (vulnérabilité faible) est formée par le sable (MP1) et le till bien drainé (MP2), deux types de milieu physique bien pourvus de superficies exemptes d'ornières.

3.2 Relations entre le drainage, la pente, la texture, les dépôts de surface et l'orniérage

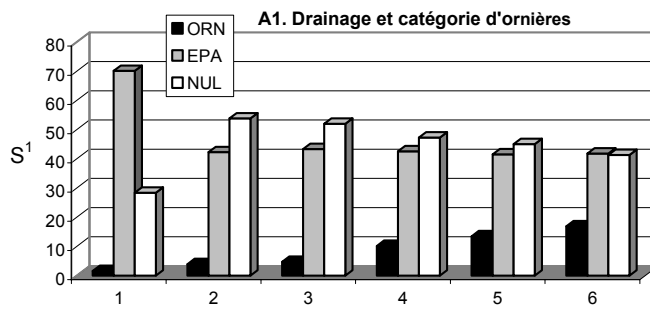
L'objectif de cette section est de présenter succinctement les principales variables utilisées dans la formation des types de milieux physiques (Figure 5). L'avantage d'une telle démarche est de comprendre l'effet d'une seule variable sur le comportement des ornières. Il faut toutefois retenir que la formation des ornières est souvent le résultat de l'action combinée de plusieurs variables. La section précédente l'a démontré.

- Drainage (Figure 8, partie A)

La figure 8A1 révèle que la proportion des ornières abondantes ne cesse d'augmenter avec une détérioration du drainage (classes 1 à 6 définies à la figure 5). Le passage des drainages mésiques (2-3) vers les classes subhydriques et hydriques (4-5-6) correspond à une proportion d'ornières abondantes, laquelle approche ou excède 10 % de la superficie des aires de coupe. La superficie sans ornière (NUL) diminue selon un rythme apparenté, mais à l'inverse de celui des ornières abondantes. Le pourcentage de superficie exempt d'ornières (NUL) chute à moins de 50 % lors de la transition des drainages mésiques vers les drainages subhydriques et hydriques. La superficie sillonnée d'ornières éparses (EPA) est sensiblement la même pour la majorité des classes de drainage, à l'exception de la classe 1 (drainage rapide). Cette dernière se démarque, notamment, par l'abondance d'ornières éparses. Les drainages de classe 1 sont rares et recensés essentiellement sur les sols très minces (MP0) (Figure 8A2).

- Pente (Figure 8, partie B)

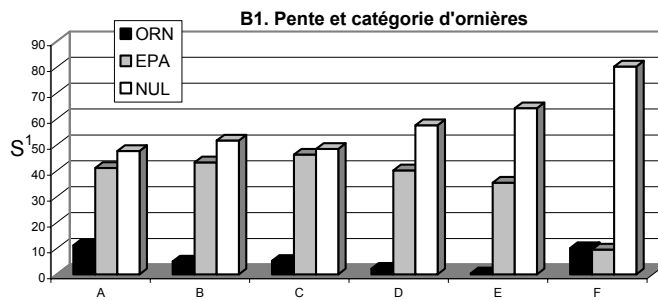
Les liens entre les ornières et la pente sont de même nature que ceux énoncés pour le drainage, et tout particulièrement en ce qui a trait aux ornières abondantes. Une telle convergence était d'ailleurs prévisible en raison des fortes associations entre ces deux variables. Ainsi, les ornières abondantes passent près de 10 % sur les pentes nulles (classe A) à moins de 1 % sur les pentes fortes (classe E). La superficie caractérisée par une absence d'ornière (NUL) diminue rapidement des pentes de classe F aux pentes de classe C. Par la suite, ces superficies demeurent pratiquement les mêmes depuis les pentes de classe A aux pentes de classe C. Cette dernière observation vaut également pour la proportion des ornières éparses (EPA), laquelle demeure sensiblement la même pour les pentes A à C. La proportion des ornières éparses chute par la suite rapidement des pentes de classe D (40 %) à la classe F (10 %) au profit des superficies couvertes par l'absence d'ornières. Ces trois dernières classes de pente sont cependant rares (Figure 8B2). On peut noter que les pentes de classe F sont parsemées d'ornières abondantes selon un niveau comparable aux pentes de classe A (près de 10 %). Par contre, la classe de pente F est celle qui présente les plus fortes superficies dénudées d'ornières (NUL = près de 80 %). On retient donc que la classe de pente F présente beaucoup de variabilités pour les ornières. Il n'y en a généralement pas, à l'exception de petits secteurs correspondant peut-être à des replats propices au passage de la machinerie. Ces derniers microsites font l'objet d'ornières abondantes.



A2. Drainage et type de milieu physique

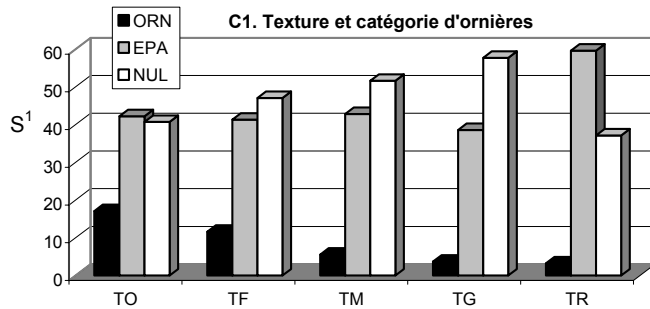
Mil. phy.	1	2	3	4	5	6
MP0	10	67	21	3		
MP1	1	41	58			
MP2		12	88			
MP3			100			
MP4				100		
MP5			18*	82		
MP6				100		
MP7				3*	97	
MP8				17*	67	17
MP9					55	45

* drainage latéral



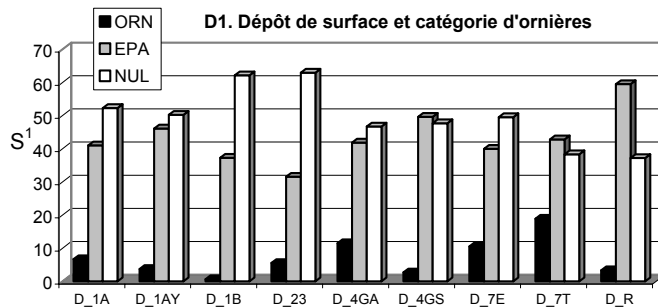
B2. Pente et type de milieu physique

Mil. phy.	A	B	C	D	E	F
MP0		28	40	16	9	7
MP1	25	59	15			
MP2	7	42	38	12	1	
MP3	17	67	17			
MP4	89	11				
MP5	47	40	12	1		
MP6	73	27				
MP7	76	24				
MP8	78	22				
MP9	92	8				



C2. Texture et type de milieu physique

Mil. phy.	TO	TF	TM	TG	TR
MP0		1	48		51
MP1			0	100	
MP2			100		
MP3		100			
MP4				100	
MP5			100		
MP6		100			
MP7		24	66	10	
MP8	67	6	28		
MP9	97				3



D2. Dépôt et type de milieu physique

Mil. phy.	1A	1AY	1B	23	4GA	4GS	7E	7T	R
MP0		48*							52
MP1			20	62		18			
MP2	56	43	1						
MP3					100				
MP4			5	37		58			
MP5	91	9							
MP6					100				
MP7	59			7	31	3			
MP8	28				6		6	61	
MP9							5	92	3

* Surtout 1AM

1. Importance relative de la superficie des catégories d'ornières définies dans les géocodes

Catégories d'ornières : ORN : Ornières abondantes, EPA : Ornières éparées, NUL : Absence d'ornière

Figure 8. Caractérisation des variables utilisées dans la détermination des types de milieux physiques en regard des catégories d'ornières et des types de milieux physiques. La signification des symboles est donnée à la figure 5.

- Texture (Figure 8, partie C)

L'information sur la texture met en évidence plusieurs éléments signalés lors de la présentation des types de milieux physiques. Dans cette section, il était clairement apparu, du moins pour les drainages subhydriques (drainages 4-5-6), que les ornières abondantes étaient de mieux en mieux représentées depuis les sols de texture grossière (MP4), vers les sols de texture moyenne (MP5) puis vers les sols de texture fine (MP6). La même logique est ici respectée alors que la proportion des ornières abondantes, laquelle se chiffre à près de 4 % pour les textures grossières (TG), atteint près de 10 % pour les textures fines (TF). Selon un gradient inverse, la superficie sur laquelle les ornières sont absentes augmente de façon notable. Elle passe de 47 % sur les textures fines à 57 % sur les textures grossières. Ces gradients ne sont pas perceptibles pour les ornières éparses. Ces dernières recouvrent plus ou moins 40 % de la superficie, quelle que soit la texture. Les dépôts organiques (TO) et les dépôts très minces (TR) se situent à l'extrémité du gradient de la superficie occupée par les ornières abondantes. La proportion observée sur les sols organiques (17 %) est supérieure à celle observée sur les sols de texture fine (12 %). À l'opposé, la superficie occupée par les ornières abondantes n'est que de 3 % sur les sols très minces (TR), ce qui représente un palier inférieur à ce qui était observé sur les sols de texture grossière (TG). On peut remarquer que les sols très minces, définis tour à tour par MP0 (Figure 5), le drainage 1 (Figure 8A1), l'absence de texture (TR, figure 8C1) et les dépôts de roc (R, Figure 8D1) correspondent sensiblement à la même unité caractérisée par une dominance d'ornières éparses (EPA).

- Dépôts de surface (Figure 8, partie D)

La présentation des ornières afférentes aux dépôts de surface permet de nuancer les résultats exposés dans la section sur les types de milieux physiques. Ce raffinement est rendu possible par le fait que les divers dépôts de surface sont subdivisés selon les textures (Figure 5). Par exemple, les milieux physiques 1 (sable mésique) et 4 (sable subhydrique) qui regroupent l'ensemble des dépôts de texture grossière sont ici segmentés selon l'origine du dépôt de surface. L'origine peut être glaciaire (dépôts 1B, 2A et 2B), fluvatile (dépôts 3) ou glaciolacustre (dépôts 4GS). Les résultats de la figure 8D1 révèlent tout d'abord que les dépôts glaciaires remaniés par l'eau (23) ou dont la morphologie est donnée par le dépôt (plutôt que par le roc) (1B) sont les moins perturbés par le passage de la machinerie. Ils présentent donc d'importantes superficies sans ornière (près de 60 %). On retrouve ici les caractéristiques de MP1. On se serait attendu à des résultats similaires pour les sables d'origine glaciolacustre de l'Abitibi (4GS), mais ce n'est pas le cas. Dans ces derniers, les ornières éparses (EPA) sont aussi bien représentées que les superficies sans ornière (NUL). Cela semble lié au fait que les sables 4GS se rencontrent fréquemment sur des drainages subhydriques (MP4, Figure 8D2). Les deux catégories de till, soit le till mince (1AY) et le till épais (1A), montrent des superficies équivalentes d'ornières éparses (EPA) ou sans ornière (NUL).

Par contre, les ornières abondantes (ORN) sont mieux représentées sur le dépôt 1A que sur le dépôt 1AY. Cela est lié en grande partie aux types de milieux physiques auxquels sont rattachés ces deux types de dépôt (Figure 8D2). Plus spécifiquement, 1AY (faiblement associé à MP5) est observé sur de meilleures conditions de drainage que 1A (fortement associé à MP5). Les dépôts argileux (4GA) offrent un portrait similaire aux dépôts organiques épais (7E). Ces derniers possèdent des superficies sillonnées d'ornières moins importantes que celles des dépôts organiques minces (7T). On se serait attendu au contraire en s'appuyant sur l'hypothèse que les sols organiques épais sont plus vulnérables à l'orniérage que les sols organiques minces. Par contre, nous considérons que les dépôts organiques épais (7E) constituent une entité marginale dans cette étude puisqu'ils ont été rarement échantillonnés (Figure 8D2, 6 % de MP8 et 5 % de MP9). En conclusion, il faut davantage retenir que la gradation depuis le dépôt 4GA vers le dépôt 7T est similaire à celle observée de MP6 à MP9 (Figure 6).

3.3 Vulnérabilité des types écologiques à l'orniérage

Les types écologiques constituent une unité de classification plus précise que les types de milieux physiques. Cela découle de l'ajout, au type de milieu physique, d'une variable descriptive de la composition et de la dynamique forestière, soit la végétation potentielle. Cet ajout permet de dissocier des sites qui, sur la base du dépôt de surface, appartiennent à une même entité. Par exemple, une vaste étendue de sable bien drainé (milieu physique 1) adossée contre une colline dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc sera généralement recouverte, dans la zone adjacente à la colline, de proportions variables de sapin, de bouleau blanc et d'épinette blanche (type écologique MS21). En s'éloignant graduellement de la colline tout en s'enfonçant dans la plaine d'épandage, la végétation se composera en majorité d'épinette noire ou de pin gris, ou d'une combinaison de ces deux essences (RE21). On vient ici d'assister au passage d'un site du type écologique MS21 (portion près de la colline) au type RE21 (portion éloignée de la colline). Ainsi, un même milieu physique peut voir sa composition et sa dynamique forestière se modifier selon divers gradients, et donner ainsi lieu à plusieurs types écologiques. Le long d'un gradient latitudinal, d'importants changements se produisent tout en demeurant sur le même milieu physique, à l'exemple du till mésique. Ce dernier dépôt est dominé par RE22 dans le domaine de la pessière, MS22 dans la sapinière à bouleau blanc et MJ22 dans la sapinière à bouleau jaune.

La végétation potentielle associée aux types écologiques permet de regrouper des peuplements de composition similaire (ex. : sab, bop, pet, epb), mais dont la proportion relative de chacune des espèces (en nombre d'individus, en surface terrière...) est fort variable. Ces peuplements peuvent appartenir à divers stades évolutifs. Par exemple, dans le cas de la végétation potentielle MS2 (sapinière à bouleau blanc), la bétulaie blanche constitue un peuplement de début de succession alors que la sapinière à

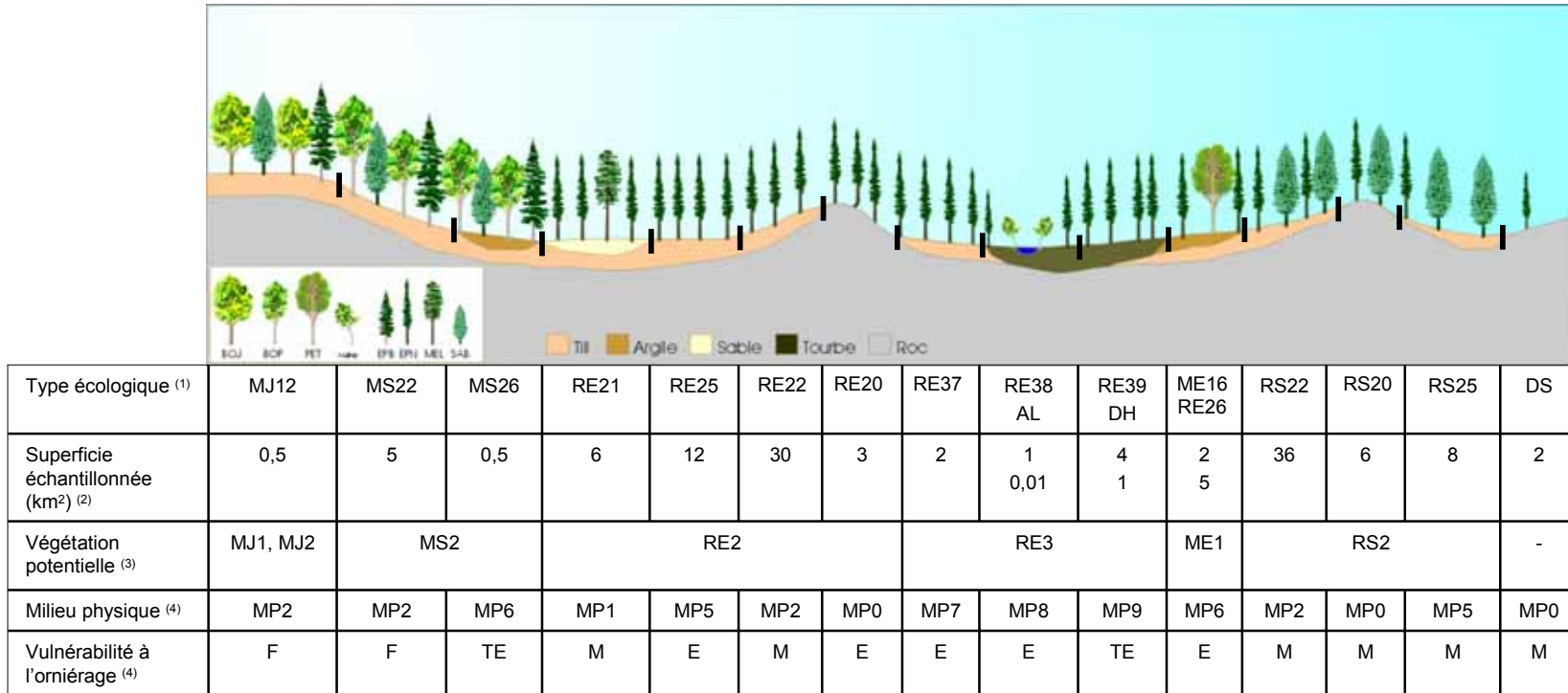
bouleau blanc représente le stade de fin de succession. En aucun cas, les concepts associés à la végétation potentielle soutiennent l'idée d'une évolution obligée d'un peuplement de début de succession vers un peuplement de fin de succession. Par exemple, ce n'est pas parce que la bétulaie blanche est associée à la végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc que le premier de ces peuplements évoluera nécessairement vers le second. Des perturbations naturelles ou anthropiques peuvent faire en sorte que le stade de la bétulaie blanche se maintienne. On peut donc retenir que la végétation potentielle (ex. : MS2) associée à chacun des types écologiques (ex. : MS22) est une étiquette identifiant un groupe d'espèces forestières (ex. : sab, bop, pet, epb). Les types écologiques définissent un ensemble d'écosystèmes qui se succèdent le long du gradient topographique, depuis les sites les plus secs vers les sites les plus humides.

On peut se demander en quoi la caractérisation des ornières peut être bonifiée par la prise en compte du type écologique ou encore de données sur la dynamique de la végétation. On verra que c'est par une relation indirecte que de tels liens s'établissent. Par exemple, le type écologique MS22 (sapinière à bouleau blanc mésique) est observé généralement sur des pentes plus fortes que le type écologique RE22 (pessière à mousses mésique). Ainsi, la relation entre le type écologique et la pente fait en sorte que les deux types écologiques précités ne présentent pas la même vulnérabilité à l'orniérage.

Les types écologiques considérés dans cette étude sont présentés aux figures 9 et 10. En comparant les figures 6 (milieux physiques) et 10 (types écologiques), le lecteur remarquera que deux types de milieux physiques, soit les argiles mésiques (type MP3) et les sables subhydriques (MP4) ne sont pas retenus dans l'analyse des types écologiques étant donné leur faible superficie (1 km² et moins). Ces deux entités sont regroupées avec d'autres types écologiques (Tableau 1). Près de la moitié des types écologiques appartiennent aux végétations potentielles de la pessière noire (RE2 et RE3). Les relations entre les types écologiques et les ornières sont illustrées aux figures 10 et 11. De ces dernières, il se dégage les éléments suivants.

Présentation des types selon leur vulnérabilité à l'orniérage

A. Les géocodes forestiers bien garnis « d'ornières abondantes » (plus de 6 % de la superficie totale) et qualifiés par une vulnérabilité élevée ou très élevée à l'orniérage s'observent essentiellement sur des types écologiques pourvus de sols subhydriques (4-5-6) ou hydriques (7-8-9). Un seul type contredit ce constat. Il s'agit de RE20 (pessière noire sur sol très mince) qui effectue le passage des unités associées à une vulnérabilité moyenne à l'orniérage vers celles associées à une vulnérabilité élevée ou très élevée. À l'opposé, un seul type écologique subhydrique est classé avec ceux moyennement propices aux ornières. Il s'agit de RS25 (sapinière à épinette noire sur sol subhydrique) qui est l'unité de transition



(1) Le type écologique est formé par l'association d'une végétation potentielle et d'un type de milieu physique. (ex. : MJ12. « MJ1 » constitue la végétation potentielle et « 2 », le type de milieu physique). Il s'agit ici de types écologiques synthèses. Les regroupements effectués sont présentés au tableau 1. Les types MJ12, MS26, RE38, AL et DH sont peu échantillonnés.

(2) La superficie totale est de 122 km².

(4) La signification des codes est donnée aux figures 5 et 6.

(3) Végétation potentielle

ME1 : Pessière noire à peuplier faux tremble

MJ1 : Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre

MJ2 : Bétulaie jaune à sapin

MS2 : Sapinière à bouleau blanc

RE1 : Pessière noire à lichens

RE2 : Pessière noire à mousses ou à éricacées

RE3 : Pessière noire à sphaignes

RS2 : Sapinière à épinette noire

Code de terrain

AL : Aulnaie

DH : Dénudé humide

DS : Dénudé sec (le recouvrement des arbres de plus de 4 m est < 25 %)

Figure 9. Caractérisation des types écologiques et estimation de leur vulnérabilité à l'orniérage.

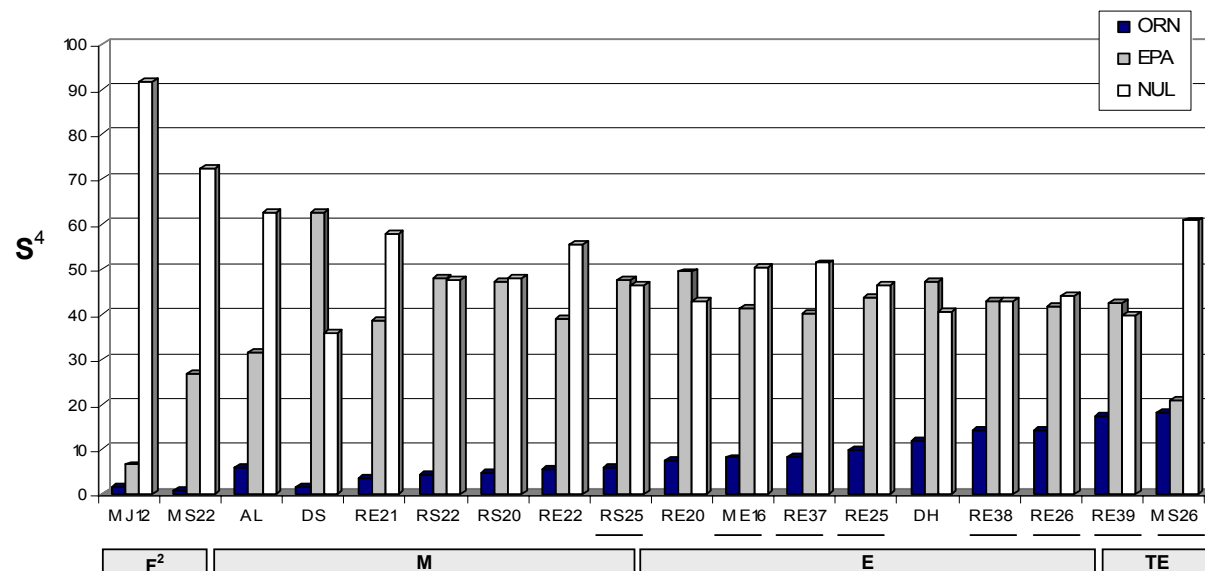
A. Type écologique et catégorie d'ornières

Type écologique ¹	ORN (%)	EPA (%)	NUL (%)	Vulnérabilité à l'orniérage ²
MJ12	1,78	6,58	91,63	Faible (F)
MS22	0,73	26,78	72,49	
AL	6,08	31,36	62,56	Moyenne (M)
DS	1,72	62,57	35,72	
RE21	3,60	38,69	57,70	
RS22	4,34	48,01	47,65	
RS20	4,75	47,23	48,02	
RE22	5,47	38,98	55,54	
RS25	5,89	47,79	46,32	
RE20	7,65	49,44	42,92	Élevée (E)
ME16	8,14	41,49	50,37	
RE37	8,32	40,31	51,37	
RE25	9,75	43,75	46,50	
DH	11,90	47,38	40,72	
RE38	14,07	42,91	43,02	
RE26	14,15	41,83	44,02	
RE39	17,43	42,66	39,90	Très élevée (TE)
MS26	18,18	20,98	60,83	

B. Type écologique et pente

Type écologique ¹	Pente ³					
	A	B	C	D	E	F
MJ12	0	17	33	33	17	0
MS22	1	24	52	21	1	0
AL	100	0	0	0	0	0
DS	0	45	42	10	0	3
RE21	39	49	13	0	0	0
RS22	3	31	47	18	2	0
RS20	1	21	40	16	13	9
RE22	13	59	25	3	0	0
RS25	15	52	30	3	0	0
RE20	0	44	38	15	0	3
ME16	66	31	3	0	0	0
RE37	76	24	0	0	0	0
RE25	64	33	2	0	1	0
DH	100	0	0	0	0	0
RE38	78	22	0	0	0	0
RE26	74	26	0	0	0	0
RE39	92	8	0	0	0	0
MS26	50	50	0	0	0	0

C. Type écologique et vulnérabilité à l'orniérage



1. Types écologiques présentés à la figure 9
 2. Vulnérabilité à l'orniérage déterminée à la figure 11
 3. Classe de pente définie à la figure 5
 4. Importance relative en superficie des catégories d'ornières définies dans les géocodes
- Catégories d'ornières : ORN : Ornières abondantes, EPA : Ornières éparées, NUL : Absence d'ornière
 — Type écologique de drainage subhydrique (4-5-6) ou hydrique (7-8-9)

Figure 10. Caractérisation des catégories d'ornières selon l'importance relative de leur superficie dans les géocodes, classés en fonction des types écologiques.

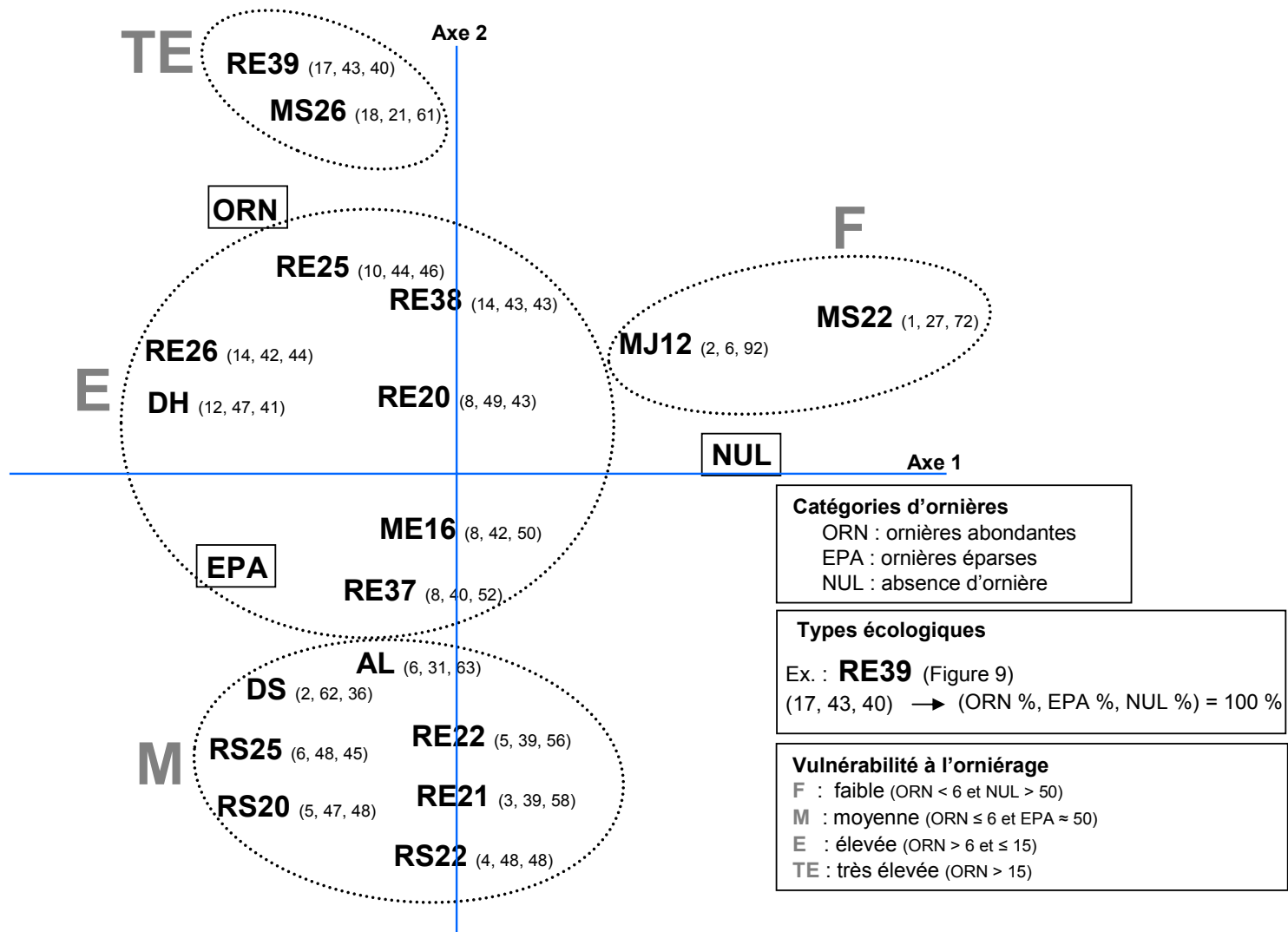


Figure 11. Position des catégories d'ornières et des types écologiques sur un diagramme d'ordination. Les types écologiques sont regroupés selon leur vulnérabilité à l'orniérage.

entre les types associés à une vulnérabilité moyenne à l'orniérage et les types dont la vulnérabilité est qualifiée d'élevée.

B. Sur la base des analyses présentées à la figure 11, quatre degrés de vulnérabilité sont mis en évidence. Ces résultats ont été retranscrits sur la figure 10. On reconnaît que les types écologiques regroupés sous la bannière d'une vulnérabilité élevée à l'orniérage auraient pu être subdivisés en deux sous-unités afin d'isoler les types sillonnés d'ornières d'une superficie supérieure à 10 % (DH, RE38, RE26), des types de superficie inférieure (RE20, ME16, RE37, RE25). La segmentation n'a pas été faite afin de respecter les résultats des analyses statistiques. Par contre, ces différences seront prises en compte dans la grille de vulnérabilité à l'orniérage présentée au chapitre quatre.

Les ornières abondantes

C. Les plus fortes concentrations d'ornières abondantes (plus de 10 %) se rencontrent sur l'argile subhydrique (RE26, MS26), les pessières noires minérotrophes (RE38) et les pessières noires ombrotrophes (RE39). À l'opposé, les ornières abondantes (ORN) recouvrent moins de 6 % de la superficie des sols de drainage mésique (MJ22, MS22, RS22, RE22, RE21) et des sols très minces (RS20, DS). RE20 est la seule exception à cette règle.

D. Les aulnaies (AL) possèdent une quantité d'ornières abondantes (6 %) supérieure à presque tous les types écologiques de vulnérabilité moyenne à l'orniérage. Par ailleurs, les superficies non perturbées par les ornières sont abondantes (plus de 60 %). Ces résultats tendent à démontrer que les aulnaies sont généralement des milieux non fréquentés par la machinerie forestière (forte abondance de superficies non perturbées par l'orniérage). Par ailleurs, dès que la machinerie y pénètre, les ornières deviennent rapidement abondantes. Enfin, les aulnaies demeurent des milieux de vulnérabilité élevée qui devraient être exempts du passage de la machinerie. On doit cependant retenir que les aulnaies constituent une unité marginale dans cette étude.

E. On observe une augmentation des superficies couvertes par les ornières abondantes (ORN), selon la séquence suivante MS22→RS22→RE22. Cette situation pourrait s'expliquer par une diminution de la pente le long de la séquence précitée. La figure 10B montre que les types MS22 et RS22 préfèrent les pentes C et D, alors que RE22 est fortement lié à la pente B.

F. L'augmentation des ornières le long du gradient des végétations potentielles (MS2→RS2→RE2) est également apparente lorsque l'on compare les sites subhydriques RS25 et RE25. Le premier de ces types possède une vulnérabilité moyenne à l'orniérage. Sa classe de pente dominante est « B » (4 à

8 %). Le second possède une vulnérabilité élevée à l'orniérage. Sa classe de pente dominante est « A » (0 à 3 %).

G. On note également une augmentation des ornières le long de la séquence RS20→RE20. La pente semble encore la cause. Elle est souvent de classe C sur RS20 et de classe B ou C sur RE20.

H. Les trois types écologiques sur argile (milieu physique 6) appartiennent à deux niveaux distincts de vulnérabilité à l'orniérage (Figure 11). MS26 côtoie les collines de till mésique (MS22), ME16 s'observe sur les vastes pessières noires ponctuées de peuplier faux-tremble, alors que RE26 caractérise les pessières noires dans lesquelles les peupliers sont absents. Selon une augmentation croissante des ornières abondantes, leur séquence est la suivante : ME16→RE26→MS26 (Figure 10). Selon la logique définie précédemment en regard des liens entre les types écologiques et la pente, on aurait pu s'attendre à ce que MS26 soit moins affecté par les ornières que ME16 et RE26. Ce n'est toutefois pas le cas même si les pentes de classe B sont plus fréquentes (50 %) sur MS26 que dans les deux autres types écologiques (Figure 10b). On retient donc que de plus amples informations seront nécessaires afin de comprendre les variations d'orniérage sur les types écologiques associés à l'argile subhydrique. L'échantillonnage sur MS26 est nettement insuffisant (Figure 9).

Les ornières éparses

I. Tout comme dans le cas des types de milieux physiques (Figure 6), les ornières éparses (EPA) couvrent une superficie beaucoup plus importante que les ornières abondantes (ORN). Celles-ci recouvrent plus de 35 % de la majorité des types écologiques (Figures 10 et 11). Tout au plus, on remarque une légère diminution depuis les types dotés d'une vulnérabilité moyenne à l'orniérage (plusieurs valeurs de EPA > 45) vers les types de vulnérabilité élevée (plusieurs valeurs de EPA < 45). Cette baisse des ornières éparses est surtout liée à une augmentation des ornières abondantes. Le type écologique dénudé sec (DS) est celui où les ornières éparses sont le mieux représentées. Il s'agit probablement d'un milieu où les surfaces, très bien drainées (fortes pentes...), alternent avec des surfaces humides (replats...) propices à l'orniérage. Enfin, la catégorie des ornières éparses diminue drastiquement vers les sites de faible vulnérabilité à l'orniérage (MJ12, MS22).

Les superficies sans ornière

J. Les superficies sans ornière (NUL) recouvrent de 40 à 45 % de la superficie de plusieurs sites subhydriques ou hydriques des végétations potentielles RE2 et RE3 (RE38, RE39, RE26). Ce pourcentage augmente légèrement (45 à 50 %) sur plusieurs types écologiques classés selon une

vulnérabilité moyenne. Enfin, les superficies sans ornière atteignent leur optimum sur le sable mésique (RE21) ainsi que sur les types écologiques MS22 et MJ12. Ce dernier constat recoupe celui rapporté précédemment au paragraphe 3.1 sur les types de milieux physiques alors que MP1 et MP2 correspondaient aux entités dont les superficies sans ornière étaient maximales. Les aulnaies présentent des superficies importantes sur lesquelles les ornières sont absentes; cette situation a été discutée précédemment (voir D).

Comparaison entre la classification des types écologiques et des types de milieux physiques

K. Lorsque l'on compare la classification des types de milieux physiques (Figure 6) et celle des types écologiques (Figure 10), on constate beaucoup de similitudes. Par exemple, les types de milieux physiques MP5 et MP7 possèdent une vulnérabilité élevée à l'orniérage, tout comme les types écologiques RE25 et RE37. Par contre, l'approche des types écologiques est plus précise. Les paragraphes précédents ont en effet montré que l'utilisation du type écologique apporte un raffinement intéressant des milieux physiques 2 (till mésique), 5 (till subhydrique) et 0 (sol très mince). Dans ces cas, on a relaté des changements de vulnérabilité à l'orniérage le long de la séquence MS2→RS2→RE2, ou d'une portion d'entre elle.

L. Le nombre de classes de vulnérabilité à l'orniérage est le même dans l'analyse des types écologiques que dans celle des types de milieux physiques (4). Les seuils décrivant l'importance relative des diverses catégories d'ornières sont sensiblement les mêmes. Les divergences demeurent mineures. Par exemple, les unités de faible vulnérabilité présentent les plus fortes superficies sur lesquelles les ornières sont absentes. Le pourcentage moyen est ici près de 80 %, alors qu'il était de 50 % dans les types de milieux physiques.

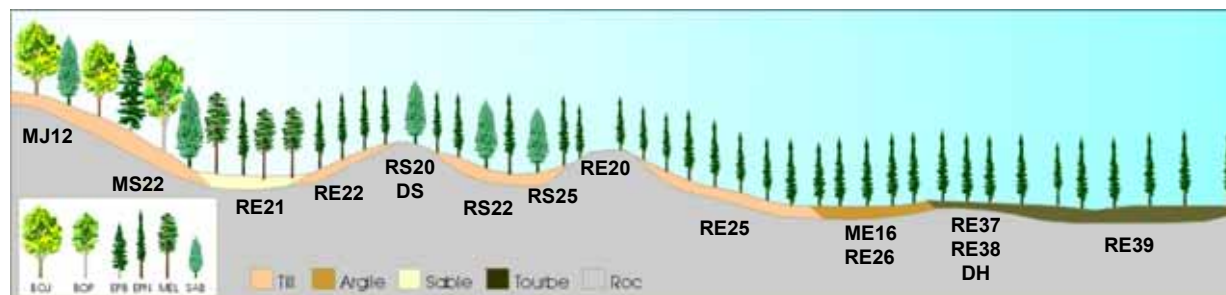
3.4 Vulnérabilité des variables descriptives du couvert forestier à l'orniérage

Le but de cette section est d'explorer les relations entre diverses catégories d'ornières et les variables descriptives de la végétation. Certaines de ces relations pourraient être éventuellement utilisées à l'intérieur de grilles destinées à évaluer la vulnérabilité à l'orniérage (sur le terrain ou par photo-interprétation). Par exemple, un peuplement de pin gris sur sable pourrait être reconnu comme peu vulnérable à l'orniérage. Ces relations entre la végétation et les ornières sont indirectes puisqu'elles découlent avant tout du milieu physique. Par exemple, si les peuplements de pin gris sur sable sont peu vulnérables à l'orniérage, la cause première de cette relation (la cause directe), demeure la présence d'un dépôt sableux.

La section qui porte sur les types écologiques faisait état de premières relations entre la végétation et les ornières. Seule la végétation potentielle (et non pas la végétation actuelle) a alors été utilisée et les résultats obtenus (Figures 10 et 11) ont été rapportés dans la partie supérieure de la figure 12. On y note, par exemple, que les sites de drainage mésique et de texture moyenne associés à la végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc (MS22) sont observés régulièrement sur des pentes de classe C (9 à 15 %, Figure 10B) et qu'une faible vulnérabilité à l'orniérage leur est attribuée. Les mêmes sites (till mésique) de la végétation potentielle de la pessière à mousses (RE2) se rencontrent surtout sur des pentes de classe B (4 à 8 %) et se voient accorder une vulnérabilité moyenne à l'orniérage. Le lecteur notera que le type écologique RE21 a été associé, sur la figure 12, aux types écologiques MJ12 et MS22. Cela ne correspond pas au résultat de la figure 11 (regroupements de types écologiques). Par contre, les liens illustrés à la figure 12 mettent en évidence l'association reconnue entre le type écologique RE21 (pessière noire sur sable de drainage xérique-mésique) et les peuplements de pin gris. De plus, pour ceux familiers avec la classification des types écologiques, les types RE39 et MS26 demeurent passablement distincts même s'ils sont regroupés à l'intérieur d'une même unité en regard de leur vulnérabilité à l'orniérage. Ce lien a été discuté au point H de la présente section.

La prise en compte des descripteurs de la végétation avant coupe, contenus dans les fichiers annexés aux cartes écoforestières du MRNF (Figure 3), permet de pousser plus à fond l'analyse des ornières. Les variables retenues se rapportent surtout au type de couvert, au groupement d'essence ainsi qu'à la hauteur, la densité et l'âge des peuplements (Figure 12). Ces données ont été soumises à des analyses similaires à celles réalisées pour les types de milieux physiques ainsi que pour les types écologiques (Figure 4). Les résultats sont présentés à la figure 13 où les variables explicatives sont rassemblées autour des trois catégories d'ornières habituelles (NUL, EPA, ORN). L'interprétation des diverses classes de vulnérabilité suit la même logique que pour les thèmes exploités précédemment (types de milieux physiques, types écologiques). De façon plus détaillée, l'information de la figure 13 et les histogrammes de la figure 14 permettent de soulever les points suivants :

A. Plusieurs variables sont associées à une faible vulnérabilité à l'orniérage. En plus des peuplements feuillus (F) et mélangés (PeR, BbR) des végétations potentielles mélangées (MJ1, MJ2, MS2), il s'agit surtout de peuplements résineux dominés ou sous-dominés par le pin gris (Pg, PgF, EPg), jeunes ou à maturité (3 050, 70, 90), relativement hauts (1, 2) et denses (A, B). Dans les peuplements pourvus de l'une ou l'autre de ces caractéristiques, les superficies dépourvues d'ornières sont abondantes après la coupe (plus de 50 % de la superficie). Par ailleurs, les superficies densément parsemées d'ornières couvrent peu de territoire (moins de 6 %). Une telle définition est conforme aux entités dotées d'une faible vulnérabilité à l'orniérage.



Susceptibilité à l'orniérage		Faible (F)	Moyenne (M)	Élevée (E)	Très élevée (TE)
Classification des milieux physiques et des types écologiques selon leur vulnérabilité à l'orniérage	Milieu physique (Figures 5, 6)	MP1, MP2	MP0, MP3	MP4, MP5, MP6, MP7, MP8	MP9
	Type écologique (Figure 9)	MJ12, MS22, RE21	AL, DS, RS20, RS22, RS25, RE22	DH, ME16, RE20, RE25, RE26, RE37, RE38	RE39, MS26
Relations entre le couvert forestier et la vulnérabilité à l'orniérage	Type de couvert	F, M, R	R	R	R, M
	Groupe d'essence	FEU, BBR, PER, PGF, EPg, Pg	ES	EE	EE
	Hauteur	1, 2	1, 2	3, 4	5, 6
	Densité	A, B	A, B	C, D	C, D
	Âge	3050, 70, 90	VIN	120	120

Type de couvert

F : feuillu
M : mélangé
R : résineux

Groupe d'essence

FEU : feuillu (BJ, BB, PE)
BBR : bouleau blanc et résineux
PER : peuplier et résineux
EE : épinette noire
ES : épinette noire et sapin
EPG : épinette noire et pin gris
PGF : pin gris et feuillu
PG : pin gris

Hauteur

1 : > 22 m
2 : 17 à 22 m
3 : 12 à 17 m
4 : 7 à 12 m
5 : 4 à 7 m
6 : < 4 m

Densité

A : > 80 %
B : 60 à 80 %
C : 40 à 60 %
D : 25 à 40 %

Âge

10 : 10 ans
3050 : 30, 50 ans et JIN
70 : 70 ans
90 : 90 ans et étagé avec 90
120 : 120 ans et étagé avec 120
VIN : vieux inéquienne

Figure 12. Synthèse des types de milieux physiques et des types écologiques selon leur vulnérabilité à l'orniérage et relations entre ces diverses vulnérabilités et les variables descriptives du couvert forestier.

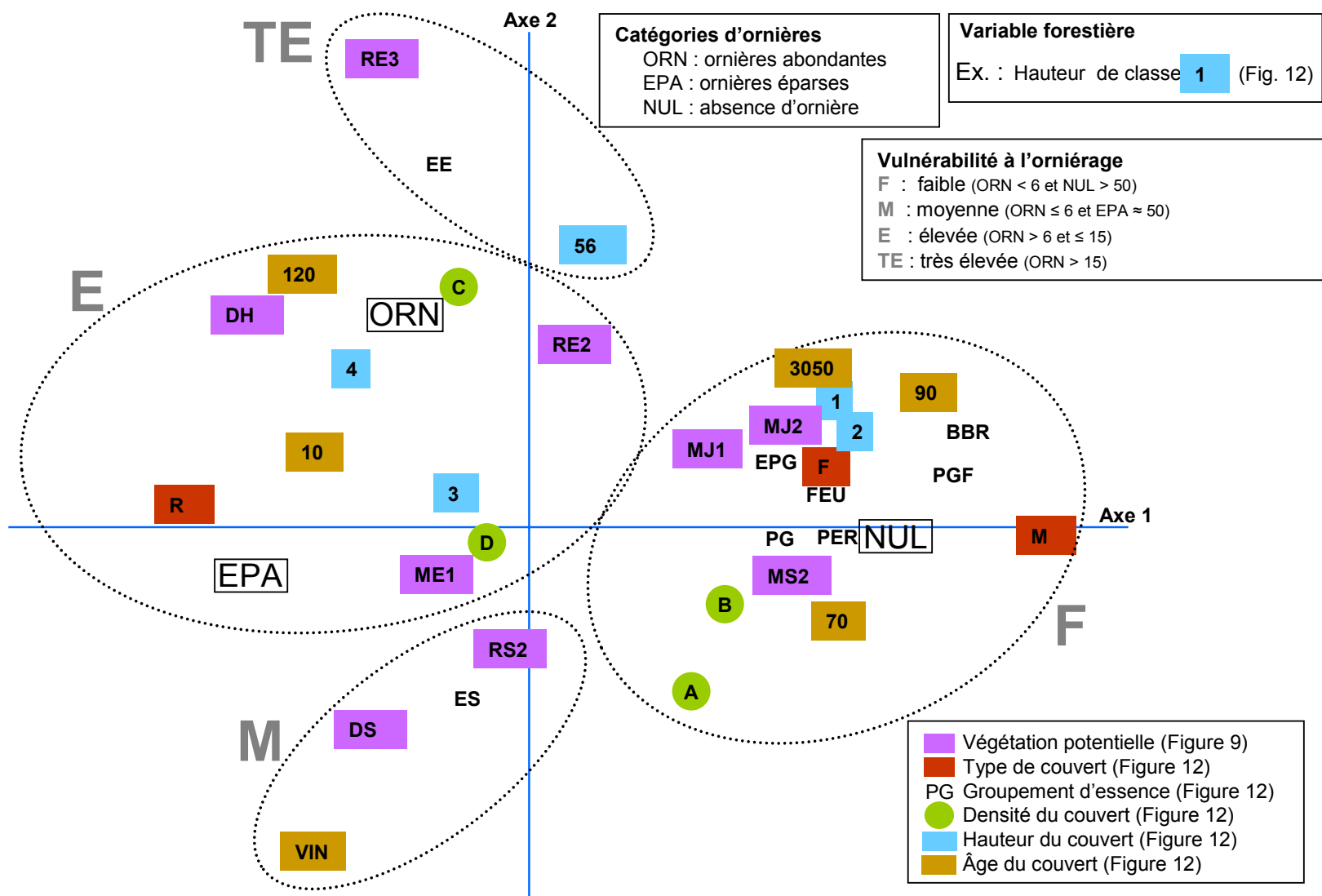
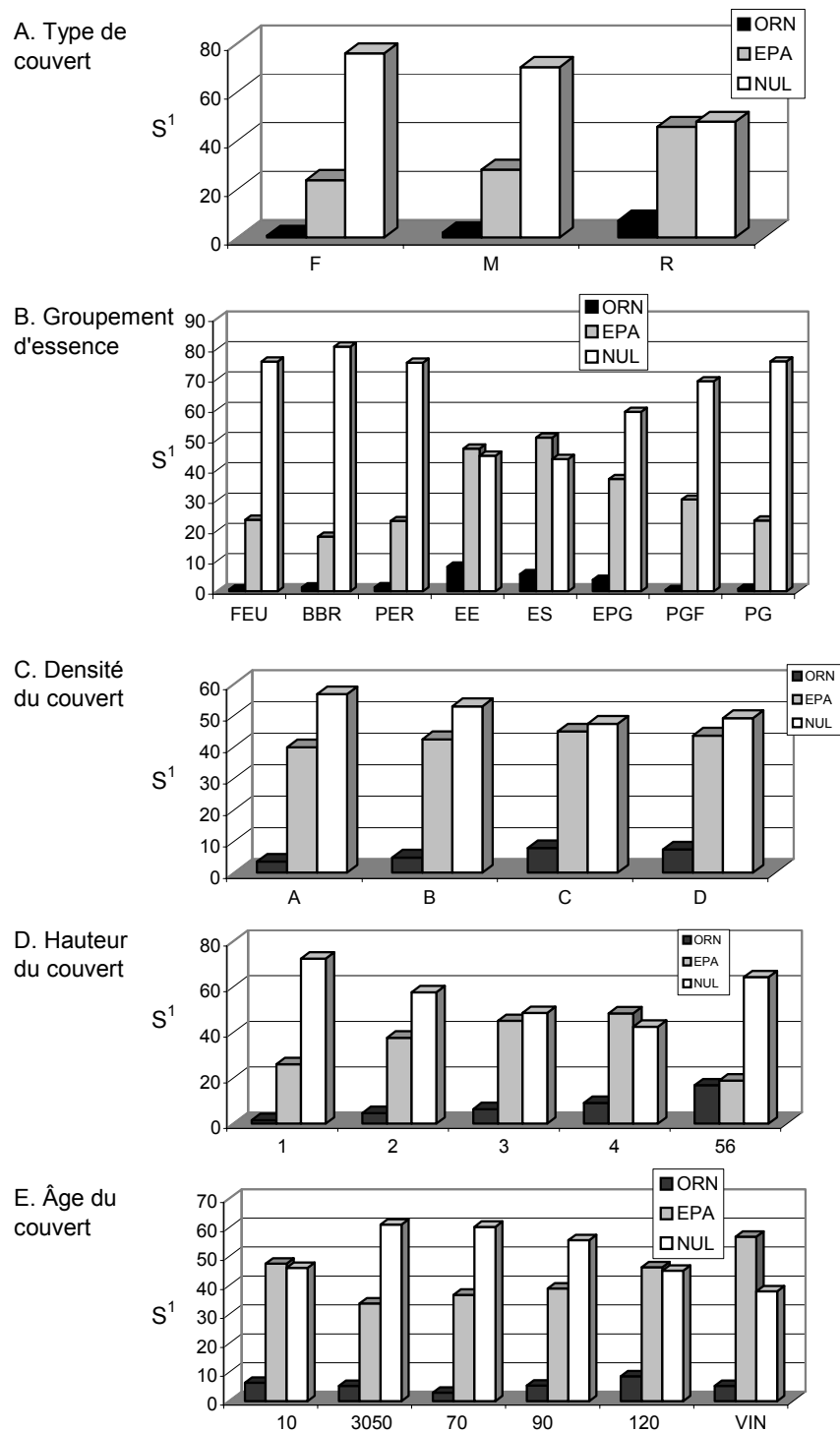


Figure 13. Position des catégories d'ornières et de quelques variables descriptives du couvert forestier sur un diagramme d'ordination. Les variables sont regroupées selon leur vulnérabilité à l'orniérage.



1. Importance relative en superficie des catégories d'ornières définies dans les géocodes

Catégories d'ornières : ORN : Ornières abondantes, EPA : Ornières éparées, NUL : Absence d'ornière

Figure 14. Caractérisation de quelques variables forestières selon les catégories d'ornières.

B. À l'opposé des peuplements définis au paragraphe précédent, on observe des peuplements résineux (R), notamment des pessières (EE), classés avec les végétations potentielles de la pessière noire à mousses (RE2) ou d'une association entre le peuplier faux-tremble et l'épinette noire (ME1). Bon nombre de ces peuplements correspondent à des pessières relativement basses (3, 4) et ouvertes (C, D). Il s'agit généralement de pessières âgées (120 ans). Les parterres de coupe qui étaient jadis caractérisés par de tels types de peuplements sont passablement affectés par les ornières et se voient attribuer une vulnérabilité élevée à l'orniérage. Comme il est précisé au début de cette section, on reconnaît que ces estimations sont le reflet indirect des caractéristiques du milieu physique. Par exemple, la présence de peuplements bas et ouverts est avant tout liée aux sols organiques. De plus, il faut être très prudent dans l'interprétation de la relation entre les peuplements âgés et la vulnérabilité élevée à l'orniérage.

C. Entre les deux niveaux de vulnérabilité décrits précédemment, s'insèrent des peuplements de vulnérabilité moyenne à l'orniérage. Il s'agit essentiellement de peuplements mixtes d'épinette noire et de sapin (ES) classés avec la végétation potentielle de la sapinière à épinette noire (RS2). Enfin, une vulnérabilité très élevée à l'orniérage est attribuée aux peuplements d'épinette noire sur sols organiques (végétation potentielle RE3).

D. En conclusion, plus un peuplement est bien pourvu d'épinette noire (avec absence de pin gris), plus il est ouvert et bas, plus grande est sa chance d'y observer des surfaces sillonnées d'ornières (vulnérabilité élevée à très élevée). Les sections précédentes nous ont montré que ces peuplements se développaient sur des sites subhydriques ou hydriques. Dans les conditions inverses, on observe des peuplements feuillus, mélangés ou bien pourvus de pin gris. Ces peuplements sont relativement hauts et denses et les ornières y sont relativement rares (vulnérabilité faible). Par ailleurs, l'utilisation de résultats axés sur la végétation doit être empreinte de beaucoup de prudence. Par exemple, bien que la majorité des peuplements EE soit associée à des surfaces parsemées d'ornières, on sait très bien que les pessières sur sable bien drainé divergent du cas moyen. Alors, une analyse du type de milieu physique ou du type écologique mène à de meilleures approximations de la vulnérabilité à l'orniérage.

3.5 Analyse des liens entre les variables écologiques et les catégories d'ornières

Les sections précédentes ont présenté le cheminement conduisant à la classification des types de milieu physique, des types écologiques et des variables forestières en rapport avec leur vulnérabilité à l'orniérage. Cette section de l'étude traite de la sélection et de la hiérarchisation des variables selon la force de leurs liens avec les diverses catégories d'ornières. En d'autres termes, nous cherchons à identifier les variables responsables de la création des ornières et de leurs liens avec une catégorie d'ornières donnée. La sélection des variables retenues dans l'analyse demeure importante. Nous avons

arrêté notre choix sur un ensemble de variables descriptives du milieu physique (pente...) auxquelles nous avons ajouté la végétation potentielle (Figure 15). Cette dernière variable permet de conserver un lien entre les variables physiques et un élément de la végétation. Afin de bien comprendre les résultats présentés au tableau 3, nous avons jugé intéressant de suivre une démarche qui, au niveau de ses premières étapes (Figure 15), est similaire à celle des sections précédentes. Ce cheminement est défini par les éléments suivants :

A. La figure 15 montre que la vulnérabilité à l'orniérage s'accroît depuis les sites bien drainés vers les sites subhydriques et les sites hydriques, soit du milieu physique 2 (MP2) vers le type de milieu physique 9 (MP9). Ce gradient est connu depuis le début de cette étude (Figure 7). Il est cependant très bien illustré le long de l'axe 2 de la figure 16A où chacun des points représente un géocode.

B. L'intérêt de la figure 15 est de joindre, aux types de milieux physiques, quelques autres variables, à l'exemple des pentes, de façon à former des groupes de variables fortement corrélées à une catégorie d'ornièrerie. Par exemple, aux milieux physiques 1 (sable bien drainé) et 2 (till de drainage modéré) viennent se joindre certaines classes de pentes spécifiques (D et E) ainsi que des végétations potentielles (MJ1, MS2). Ainsi, les conditions propices à l'absence d'ornièrerie (NUL) ou encore à une faible vulnérabilité à l'orniérage sont mieux connues. La bonne relation entre la vulnérabilité à l'orniérage des divers types de milieux physiques et les classes de pente ressort également très bien lorsque l'on compare les figures 16A et 16B. En effet, plus la pente est faible (F→A), plus les ornières sont abondantes.

C. Lors de l'analyse d'un diagramme d'ordination, il est reconnu que plus une variable est éloignée du centre, plus forts sont ses liens avec une catégorie d'ornières (LEGENDRE et LEGENDRE 1998). Par exemple, à la lecture de la figure 15, nous sommes en mesure de poser l'hypothèse que les milieux physiques hydriques sur tourbe (MP9) devraient avoir une incidence importante sur la création d'ornières abondantes (ORN). La figure 16A confirme cette appréhension par le fait que les géocodes appartenant à MP9 sont concentrés dans la portion supérieure gauche du diagramme d'ordination. Dans ces derniers géocodes, la superficie moyenne recouverte par des ornières abondantes est de 17 % (Figure 6). On peut donc en conclure que la probabilité qu'un géocode classé avec MP9 soit fortement propice à l'orniérage (ORN), lors du passage de la machinerie, est élevée. Il en est de même pour les pentes de classe A, la végétation potentielle RE3 (pessière noire à sphaignes) et la présence de tourbières (DH, dénudés humides). Ces trois dernières variables (pente A, végétation potentielle RE3, dénudés humides) possèdent d'ailleurs une valeur de F (plus de 20) nettement supérieure à celle de MP9 (5,8) (Tableau 3). MP9 demeure toutefois le milieu physique qui a le meilleur pouvoir prédictif d'une catégorie d'ornièrerie parce qu'il a une valeur de F supérieure à celle des autres types de milieux physiques. Cette hypothèse

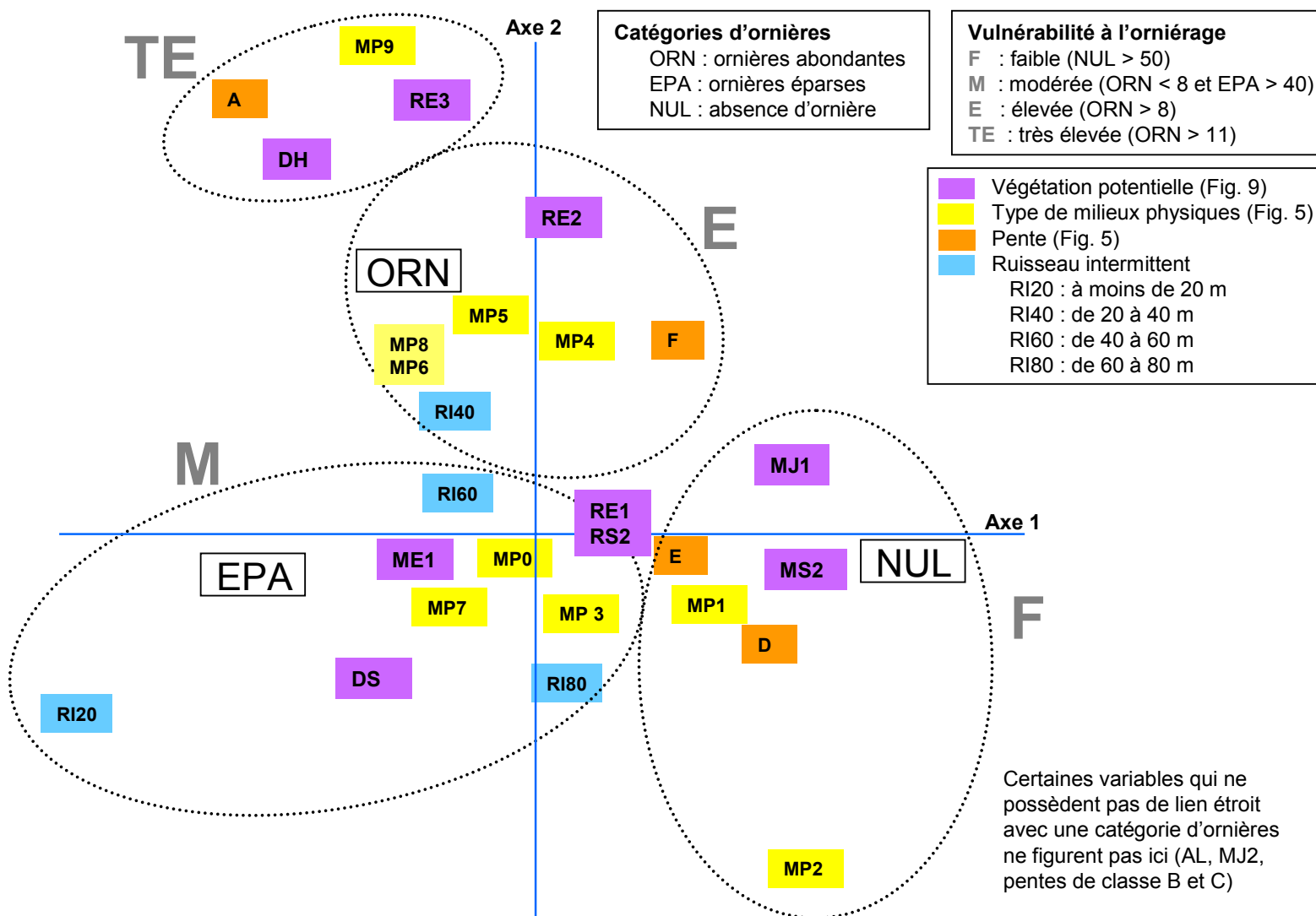


Figure 15. Position des catégories d'ornières et de quelques variables explicatives sur un diagramme d'ordination. Les variables sont regroupées selon leur vulnérabilité à l'orniérage.

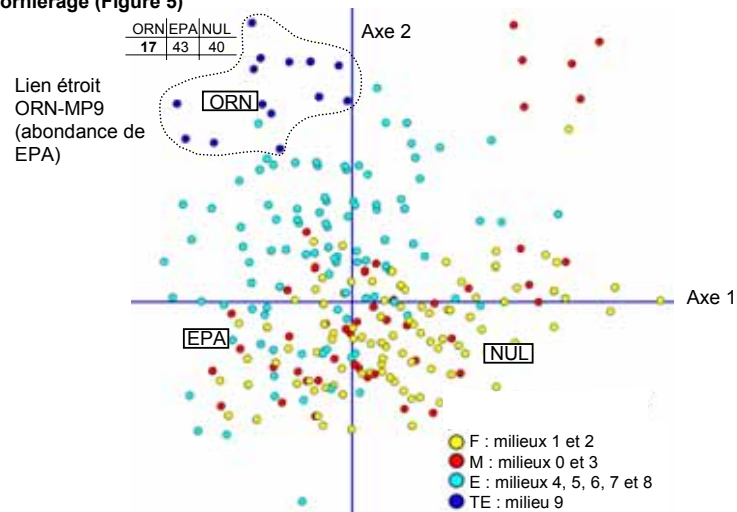
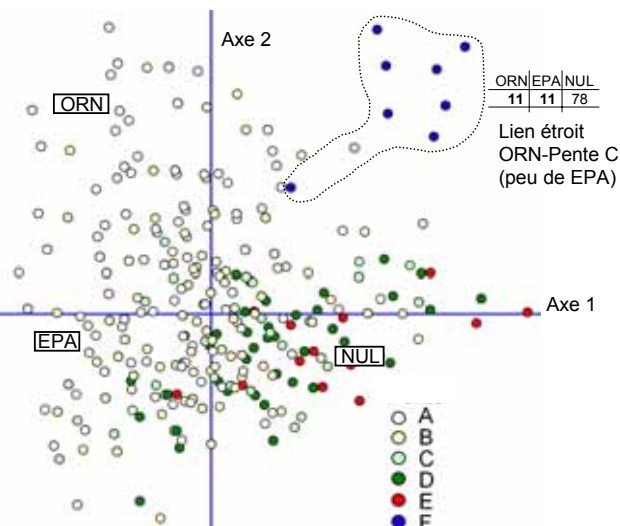
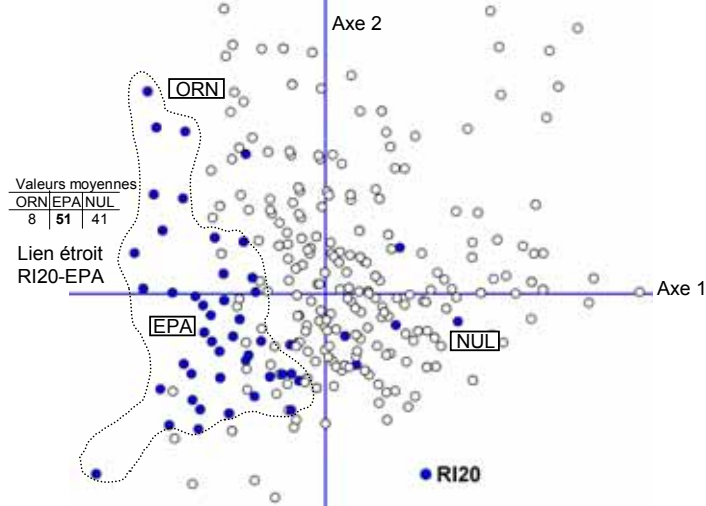
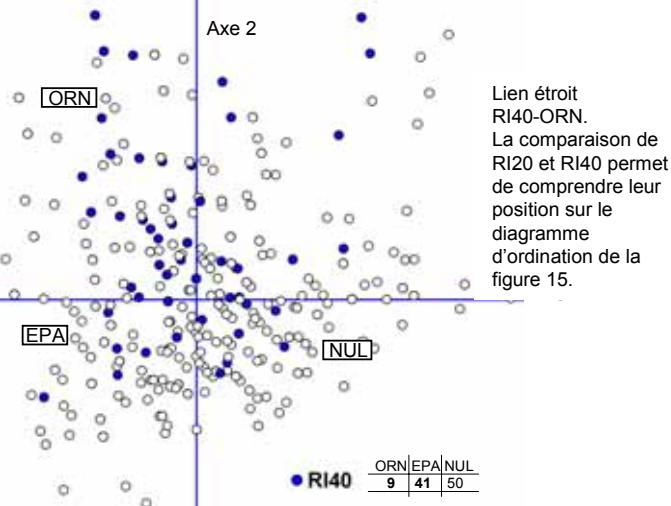
A. Milieux physiques regroupés en fonction de leur vulnérabilité à l'orniérage (Figure 5)**B. Pente (Figure 5)****C. Ruisseau intermittent à moins de 20 m (RI20)****D. Ruisseau intermittent de 20 à 40 m (RI40)**

Figure 16. Position des catégories d'ornières et des 1 763 géocodes à l'étude en regard de quelques variables explicatives. Certains éléments sont mis en évidence afin de mieux comprendre la position des variables sur la figure 15.

Tableau 3. Énumération et hiérarchisation des variables explicatives par rapport à leurs liens avec les catégories d'ornières

A. Liste des variables selon la force de leurs liens avec les catégories d'ornières

B. Classification des variables selon les catégories d'ornières

Code	Variable	p*	F**		
RI20	Ruisseau intermittent (0 à 20 m)	0,002	70,63	A	ORN (ornières abondantes)
A	Pente (A)	0,002	30,40	F	
RE3	Pessière noire à sphaignes	0,002	25,94	RE3	
DH	Dénudé humide	0,002	22,59	DH	
MS2	Sapinière à bouleau blanc	0,002	19,24	RI40	
MJ1	Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre	0,002	15,89	MP9	
DS	Dénudé sec	0,002	9,39	RE2	
F	Pente (F)	0,002	7,13	MP5	
RI40	Ruisseau intermittent (20 à 40 m)	0,008	7,16	MP4	
D	Pente (D)	0,008	6,71	RI20	EPA (ornières éparses)
RI60	Ruisseau intermittent (40 à 60 m)	0,008	6,23	DS	
MP9	Type de milieu physique (9)	0,010	5,80	RI60	
MP2	Type de milieu physique (2)	0,014	3,97	RI80	
RE2	Pessière noire à mousses ou à éricacées	0,018	5,07	MP0	
MP5	Type de milieu physique (5)	0,020	4,52	AL	
E	Pente (E)	0,024	4,19	MP7	
1 RI80	Ruisseau intermittent (60 à 80 m)	0,038	3,59	MP3	
MP1	Type de milieu physique (1)	0,054	3,62	MS2	NUL (absence d'ornière)
MP4	Type de milieu physique (4)	0,094	2,36	MJ1	
MP0	Type de milieu physique (0)	0,212	1,36	D	
AL	Aulnaie	0,228	1,45	MP2	
MP7	Type de milieu physique (7)	0,230	1,34	E	
MP3	Type de milieu physique (3)	0,344	0,99	MP1	

Autres variables non significatives : MP6, MP8, RE1, RS2, ME1, MJ2, pentes B et C

* Seuil observé (p value)

** Valeur de F

1. Seuil en deçà duquel les variables ne sont plus fortement corrélées à une catégorie d'ornières

	Végétation potentielle (Figure 9)
	Type de milieu physique (Figures 5 et 6)
	Pente (Figure 5)
	Ruisseau intermittent (Figure 15)

découle de la lecture du tableau 3A où aucun autre type de milieu physique n'occupe une position plus élevée que MP9.

D. Deux autres types de milieu physique possèdent une forte association avec une catégorie d'ornières (Tableau 3). Il s'agit de MP2 et MP5. MP2 est associé à l'absence d'ornière (NUL) et MP5 aux ornières abondantes (ORN) (Figures 15 et 16B). En plus de MP2, d'autres variables sont de bons indices d'une absence d'ornière après le passage de la machinerie. Il s'agit de MS2, MJ1, pente D et pente E. La majorité de ces variables (MS2, MJ1, pente D) possèdent une valeur de F nettement supérieure à celle de MP2 (3,97) et, de ce fait, elles pourraient être considérées comme de meilleurs indices d'une faible vulnérabilité à l'orniérage. L'association entre MP5 et les ornières abondantes (ORN) est également reliée aux variables RE2, RI40 et aux pentes de classe F. La relation entre les pentes F et la présence d'ornières abondantes peut sembler inadéquate en raison du drainage de bonne qualité qu'on lui associe. La relation pente F-ORN, observée à la figure 8B1, est reconnue depuis le début de l'étude. Comme il a déjà été précisé, on croit qu'elle est reliée à des microreplats humides passablement fréquentés par la machinerie forestière.

E. Parmi les dix types de milieux physiques étudiés, seulement les trois rapportés dans les paragraphes précédents sont fortement liés à une seule catégorie d'ornières (MP9, MP2, MP5). En d'autres termes, seulement ces derniers types de milieux physiques possèdent le pouvoir de prédire, avec une certaine assurance, une catégorie d'ornières. Tous les autres sont plus polyvalents. On les observe d'ailleurs dans la partie centrale de l'ordination de la figure 15 (MP1, MP4, MP0, MP7, MP3, MP6, MP8).

F. Bien que la valeur des types MP1 et MP4 ne soit pas significative au seuil généralement reconnu ($p = 0,05$), on note que la valeur atteinte par les seuils observés (p value) est très près de cette valeur. MP1 et MP4 rassemblent tous les milieux physiques sur sable, de drainage mésique (MP1-surtout les dépôts 1b et 23) ou subhydrique (MP4-surtout le dépôt 4GS). Tous deux possèdent des valeurs fortement apparentées, en regard de leurs ornières éparses (EPA) et des superficies sans ornière (NUL). Ils ne se distinguent que par la superficie couverte par les ornières abondantes (Figure 6). Cette description va de pair avec ce qui est observé sur la figure 15. En d'autres termes, il s'agit de milieux physiques pour lesquels il est difficile de prévoir l'impact causé par le passage de la machinerie. Dans certaines conditions, les ornières seront abondantes alors que dans d'autres elles seront éparses ou nulles. L'explication de ce phénomène dépasse les limites de cette étude. Cette explication est possiblement reliée 1) à des variables pour lesquelles nous n'avons pas d'information (période de récolte, information sur les conditions météorologiques avant la récolte...) et 2) à la qualité de l'information sur laquelle repose notre analyse (photo-interprétation).

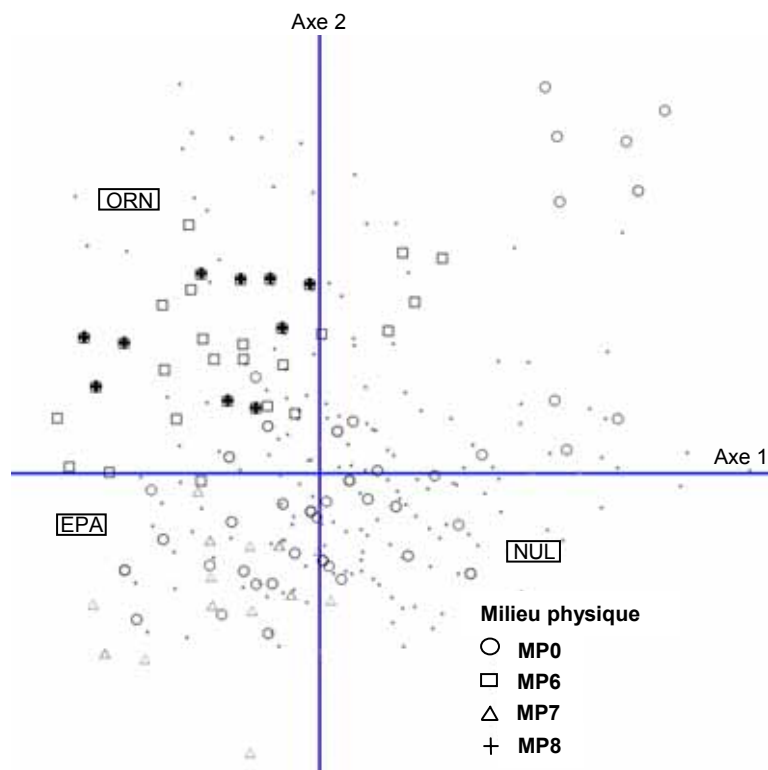


Figure 17. Position des catégories d'ornières et des géocodes de quelques milieux physiques faiblement liés à une catégorie d'ornières. Il s'agit essentiellement de milieux physiques possédant une distribution étalée.

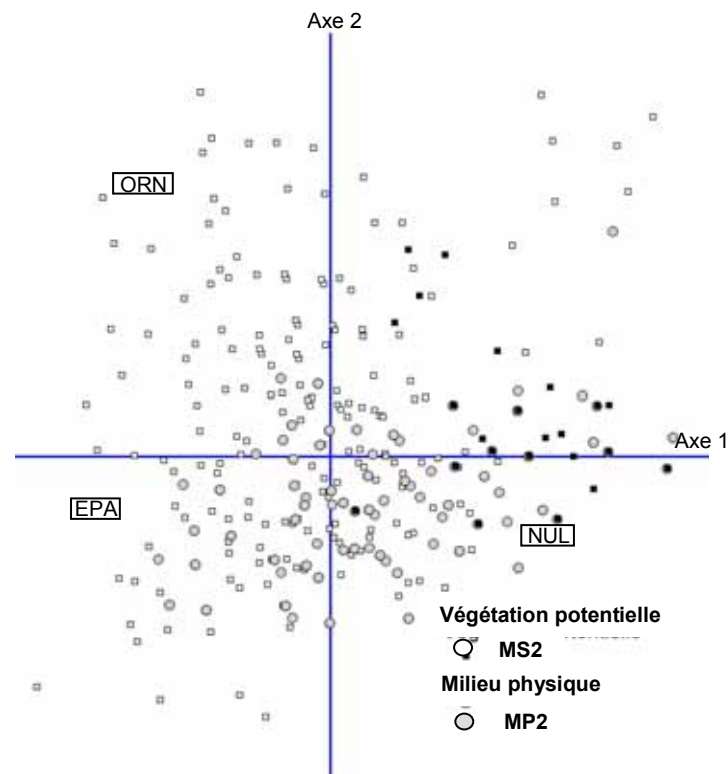


Figure 18. Position des catégories d'ornières et des géocodes correspondant au type de milieu physique sur sol mince à épais, de drainage mésique et de texture moyenne (MP2) ainsi qu'à la végétation potentielle de la sapinière à bouleau blanc (MS2). On note que la répartition de MP2 est beaucoup plus large que celle de MS2. Le lien NUL-MS2 est donc plus fort que celui entre NUL et MP2. Cela se répercute sur les valeurs de F présentées au tableau 3 (MS2 : 19 et MP2 : 3).

G. Le phénomène présenté pour les types MP1 et MP4 prend encore plus d'importance pour les cinq autres types de milieux physiques non commentés jusqu'ici (MP0, MP7, MP3, MP6, MP8). Le milieu physique MP0 est celui qui montre le plus d'hétérogénéité (Figure 17). Cela est en partie causé par l'abondance de surfaces sillonnées d'ornières lorsque ce milieu physique est observé sur des pentes de classe F (Figure 16B).

H. Les quatre variables descriptives des ruisseaux intermittents (RI20, RI40, RI60, RI80, Tableau 1) possèdent un lien significatif avec l'une ou l'autre des catégories d'ornières. Toutes ces variables ont effectivement un seuil observé (p value) inférieur à 0,05 (Tableau 3). Les ruisseaux intermittents localisés à moins de 20 m d'un géocode (RI20) constituent la variable la plus importante dans la création d'ornières. Cela est révélé par de fortes valeurs négatives sur l'axe 1 (Figure 15) ainsi que par la forte valeur de F (70) (Tableau 3A). La figure 16C montre que les géocodes caractérisés par la présence d'un ruisseau localisé à moins de 20 m se situent dans la portion la plus négative de l'axe 1. Cette dernière figure permet donc de bien comprendre la position de RI20 sur la figure 15. De plus, la figure 16C met en évidence le fait que les géocodes, caractérisés par RI20, démontrent une forte variation en regard des ornières abondantes. Plus un géocode est localisé près de la catégorie ORN, plus importante est la superficie couverte par les ornières abondantes. Ces géocodes appartiennent également à plusieurs types de milieux physiques comme le démontre la superposition des figures 16C, 16A et 17. Par contre, presque tous les géocodes caractérisés par RI20 ont en commun une proportion élevée d'ornières éparses (EPA).

I. Les trois autres variables descriptives des ruisseaux intermittents possèdent des valeurs de F nettement inférieures à celles de RI20. Cela se répercute sur la position de ces variables sur l'ordination de la figure 15, où RI40, RI60 et RI80 se situent près du centre des axes. RI60 et RI80 sont, tout comme RI20, associés à la catégorie des ornières abondantes (Figure 15, Tableau 3B). Par ailleurs, RI40 est lié à la catégorie des ornières abondantes. La répartition des géocodes appartenant à RI40 sur l'ordination de la figure 16D permet de comprendre cette classification. On y note en effet que quelques géocodes caractérisés par une quantité d'ornières abondantes se réfèrent à RI40. Nous ne pouvons expliquer pourquoi RI40 est lié à ORN alors que RI20, RI60 et RI80 sont fortement associés à EPA. Un échantillonnage plus important que celui utilisé dans cette étude ainsi qu'une analyse plus minutieuse des relations entre les ornières et les ruisseaux intermittents pourraient permettre de lever cette ambiguïté.

J. Parmi les onze végétations potentielles (Figure 9), six sont fortement associées avec une catégorie d'ornières. Cinq d'entre elles (RE3, DH, MS2, MJ1, DS) possèdent des valeurs de F élevées, ou du moins supérieures à tous les milieux physiques (Tableau 3A). En d'autres termes, a) RE3 et DH sont plus

fortement liés à ORN que MP9 et b) MS2 et MJ1 sont plus fortement associés à EPA que MP2. Ce phénomène s'explique par le fait que la distribution des végétations potentielles sur les diagrammes d'ordination est beaucoup plus localisée que celle des milieux physiques. Par exemple, la figure 18 montre très bien l'association NUL-MS2 (F : 19) alors que la relation NUL-MP2 est beaucoup plus diffuse. MP2 peut effectivement être lié à plusieurs végétations potentielles, en particulier MS2, RS2 et RE2. Ainsi, on peut retenir que la végétation potentielle ainsi que le type écologique (section 3.3) constituent de meilleurs estimateurs de la catégorie d'ornières que le type de milieu physique. En d'autres termes, MS2 est un bon indicateur de l'absence d'ornière. Par contre, le milieu physique 2, qui peut se jumeler autant à MS2, RS2 que RE2 présente une plus grande variabilité. Le long de cette séquence, la proportion d'ornières abondantes passe de 0,7 à 5,5 (Figure 10A).

K. À l'inverse du paragraphe précédent, cinq végétations potentielles (AL, RE1, RS2, ME1, MJ2) ne possèdent pas une association significative avec une catégorie d'ornières. Celles-ci possèdent une répartition relativement vaste, à l'exemple de certains types de milieux physiques (Figure 17). Dans la majorité des cas, il s'agit de végétations potentielles faiblement échantillonnées.

L. Parmi les six classes de pente (Figure 5), quatre (A-F-D-E) sont fortement associées à une catégorie d'ornières (Tableau 3). La pente A occupe une position privilégiée dans la hiérarchie puisqu'il s'agit de la seconde en importance. Ces liens sont très forts avec les ornières élevées. Enfin, les pentes B et C ne sont liées à aucune catégorie d'ornière. Il s'agit de pentes « ubiquistes », et tout particulièrement de la pente de classe B qui est bien représentée sur la majorité des types de milieux physiques (MP0 à MP8, Figure 8).

Chapitre quatre

Grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage

Cette étude a porté sur un nombre limité d'assiettes de coupe totalisant une superficie restreinte. L'analyse des ornières présentes dans ces assiettes de coupe a permis 1) de définir une vulnérabilité à l'orniérage pour divers niveaux de perception (types de milieux physiques, types écologiques, variables forestières) et 2) de caractériser les liens entre les catégories d'ornières (ORN, EPA, NUL) et un ensemble de variables explicatives. Ce dernier chapitre sera consacré à l'élaboration d'une grille d'évaluation de la vulnérabilité, qui peut être considérée comme une synthèse des analyses réalisées. Cette grille permettra 1) d'extrapoler les résultats obtenus sur de plus vastes territoires, notamment à l'échelle des aires communes, 2) d'identifier les territoires les plus propices à l'orniérage et 3) de définir des stratégies d'aménagement destinées à limiter les superficies orniérées.

La grille élaborée (Figure 19) donne la priorité aux types de milieu physique. Par contre, la prise en compte de données sur la pente fait en sorte que la finesse obtenue au niveau des classes de vulnérabilité est sensiblement la même que si l'on avait utilisé le type écologique. Le type de milieu physique a été privilégié puisque son identification est plus facile que celle du type écologique, surtout sur des parterres de coupe récente. De plus, la grille contient cinq classes de vulnérabilité, comparativement à quatre pour la section portant sur les analyses. La classe moyenne-élevée a été ajoutée. Cet ajout est conséquent à l'examen de la logique de la gradation de la vulnérabilité à l'orniérage des diverses unités présentées sur la clé, depuis les sols hydriques vers les sols mésiques. En effet, nous avons préféré scinder en deux portions les types écologiques de vulnérabilité élevée à l'orniérage (Figure 10C). Dans la première portion, les superficies comblées d'ornières (ORN) couvrent moins de 10 % de la superficie et une vulnérabilité moyenne à élevée (M-E) leur est attribuée. En définitive,

Épaisseur du dépôt	Très mince ⁽¹⁾		De mince à épais (>25 cm)															
Drainage synthèse (2)	Variable		Mésique					Subhydrique					Hydrique					
Code de milieu physique (3)	0		1	2		3		4	5		6		7		8			9
Texture synthèse (4)	Variable		Grossière	Moyenne		Fine		Grossière	Moyenne		Fine		Gros-moy.	Fine	Gros-moy.	Fine	n/a	n/a
Classe de pente (5)	A - B	C - D - E - F	A - B - C	A - B - C	D - E	Toutes	A - B - C	A - B	A	B - C - D	Toutes	A - B	A - B	A - B	A - B	A - B	A - B	A - B
Dépôt (6)																		
glaciaire		(M1A-R1A)	(1B)	(1A-1AY)	(1A-1AY) (1AM)				(1A-1AY)	(1A-1AY) (1AM)			(1A-1AY) (1AM)					
fluvio-glaciaire			(2A-2B)					(2A-2B)					(2A-2B)		(2A-2B)			
fluvatile			(3)					(3)					(3)		(3)			
lacustre			(4GS - 4P)				(4GA)	(4GS - 4P)				(4GA)	(4GS - 4P)	(4GA)	(4GS - 4P)	(4GA)		
marin	(M5S-R5S)		(5S, 6S)				(5A - 5G)	(5S, 6S)				(5A - 5G)	(5S, 6S)	(5A - 5G)	(5S, 6S)	(5A - 5G)		
organique	(7TM-M7T) (R7T)																(7E-7T) (7TY-7TM)	(7E-7T) (7TY-7TM)
de pente							(8C - 8G)											
altération						(8A-8AY) (8AM)					(8A-8AY) (8AM)							
éolien			(9)															
roc	(R)	(R)																
Vulnérabilité à l'orniérage (7)	ME	M	F	M*	F	F	M	ME	ME	M**	M	E	E	TE	E	TE	TE	TE
Type écologique ⁽⁸⁾	RE20	RS20	RE21	RE22	MS22	---	---	---	RE25	RS25	---	RE26	RE37	---	---	---	RE38	RE39

* Les pentes C du type écologique MS22 possèdent une vulnérabilité F plutôt que M. ** Les pentes B du type écologique RE25 possèdent une vulnérabilité M-E plutôt que M.

- (1) Il est difficile d'évaluer la vulnérabilité à l'orniérage sur les dépôts très minces (code « 0 »), dépôts de moins de 25 cm d'épaisseur. Une tourbe mince recouvre souvent le dépôt minéral.
- (2) Drainage synthèse, mésique : mouchetures visibles à plus de 50 cm d'épaisseur; subhydrique : mouchetures visibles à moins de 50 cm; hydrique : sol minéral fortement gleyifié ou sol organique mal drainé, on observe un excès d'eau durant toute l'année.
- (3) Ces codes sont définis à la figure 5.
- (4) La texture grossière regroupe les dépôts à dominance de sable. La texture moyenne correspond aux dépôts à dominance de loam et les limons. La texture fine regroupe les dépôts qui contiennent de l'argile, tels les dépôts d'altération (Gaspésie). N/A signifie non applicable.
- (5) Les classes de pente sont présentées à la figure 5. Sur les pentes abruptes (classe F), on évalue plutôt les risques d'érosion que ceux de la vulnérabilité à l'orniérage.
- (6) Les dépôts de surface sont décrits dans le document intitulé : Le point d'observation écologique de Saucier *et al.* (1994). Il faut noter que les dépôts retenus dans cette clé ne sont plus, comme dans le reste du document, des dépôts synthèses développés spécifiquement pour la présente étude (Tableau 1).
- (7) La vulnérabilité est estimée pour des conditions de précipitations moyennes survenant durant la période de croissance
 F : Classe faible : dépôts de drainage mésique, 1) de texture grossière, 2) de texture moyenne et de pente moyenne à forte (D-E) ou 3) de texture fine (altération).
 M : Classe moyenne : dépôts 1) de drainage mésique 1a) de texture moyenne et de pente nulle à douce (A-B-C) ou 1b) de texture fine (marin, lacustre) et 2) dépôt de drainage subhydrique 2a) de texture moyenne et de pente faible à modérée (B-C-D) ou 2b) de texture fine (altération) et 3) roc de pente douce à abrupte (C-D-E-F).
 M-E : Classe moyenne-élevée : dépôts 1) de drainage subhydrique, 1a) de texture grossière ou 1b) de texture moyenne et de pente faible (A) ou 2) roc de pente nulle ou faible (A-B).
 E : Classe élevée : dépôts 1) de drainage subhydrique et de texture fine (dépôt glaciolacustre -4GA- ou marin -5A, 5G) ou 2) de drainage hydrique sur sol minéral de texture moyenne ou grossière.
 TE : Classe très élevée : dépôts de drainage hydrique sur 1) sol minéral de texture fine ou 2) sur sol organique.
- (8) Sont présentés, à titre d'exemple, certains types écologiques qui ont fait l'objet de la présente étude.

Figure 19. Grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage en fonction des types de milieux physiques.

Les sols subhydriques de texture moyenne (RE25) sont classés avec la catégorie moyenne-élevée. Dans le second ensemble (Figure 10C), les superficies fortement sillonnées d'ornières couvrent plus de 10 % et les milieux physiques présents (6 et 8) sont classés selon une vulnérabilité élevée ou très élevée. Il s'agit essentiellement des types écologiques RE26 et RE38. De plus, la nouvelle classe (M-E) demeure cohérente avec les résultats portant sur les types de milieux physiques (Figure 6) ainsi que ceux de SIGOUIN (2002, Figure 20). Les résultats de cette auteure s'apparentent aux nôtres par les éléments suivants :

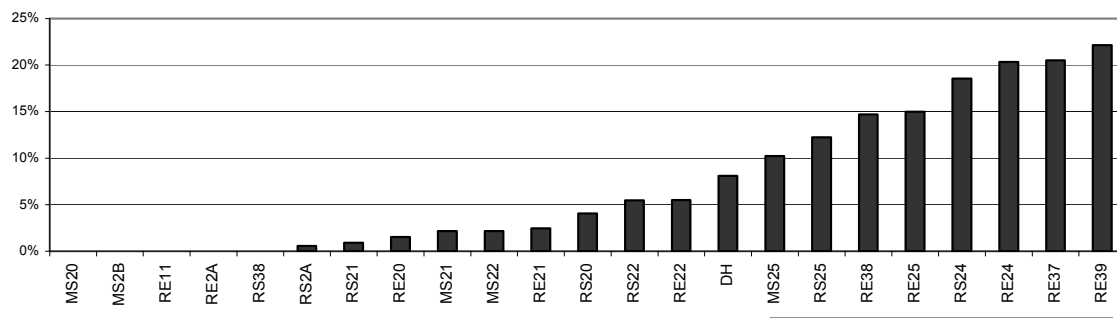
- une progression de l'abondance de sols sillonnés d'ornières depuis les sites mésiques vers les sites subhydriques et hydriques;
- une augmentation de l'orniérage depuis la végétation potentielle MS2 vers RS2 puis RE2 sur les sols mésiques de texture moyenne (MS22→RS22→RE22), sur les sols subhydriques de texture moyenne (MS25→RS25→RE25) ainsi que sur les sols subhydriques de texture grossière (RS24→RE24). Comme il a déjà été mentionné, ces gradations pourraient être liées à une diminution de la pente le long de la séquence des végétations potentielles. Par exemple, MS22 est observé sur des pentes supérieures à RE22.

Par ailleurs, les résultats de SIGOUIN (2002) diffèrent des nôtres par les points suivants :

- la hiérarchie des végétations potentielles n'est pas respectée dans le cas des sols très minces. On note une augmentation de l'orniérage de RS20 vers RE20 (SIGOUIN 2002) plutôt que de RE20 vers RS20 (présente étude);
- RE37 et RE39, deux types écologiques sur sols hydriques, sont fortement liés dans les résultats de SIGOUIN (2002) alors que, dans la présente étude, RE37 avait tendance à se positionner près des sols subhydriques. Les résultats de SIGOUIN (2002) semblent plus réalistes.

Afin de bien comprendre les distinctions entre, d'une part, la grille de vulnérabilité à l'orniérage proposée (Figure 19) et, d'autre part, la classification des types de milieux physiques et des types écologiques présentée autant dans cette étude (Figures 5 et 9) que dans celle de SIGOUIN (2002, Figure 20), il faut prendre en compte ce qui suit :

A. Les dépôts de texture fine (milieux physiques 3 et 6) analysés dans les territoires témoins se limitent à l'Abitibi. De telles textures sont observées également en Gaspésie, mais à l'intérieur d'une matrice dominée par des roches sédimentaires. Ces derniers ensembles sont classés avec les dépôts d'altération (8A, 8AY, 8AM). Ils doivent être distingués de ceux de l'Abitibi (4GA) puisqu'ils ne présentent pas la même vulnérabilité à l'orniérage. Ces deux entités sont donc distinguées à la figure 19.



Code	Type écologique
DH	Dénudé humide (code de terrain)
MS20	Sapinière à bouleau blanc sur dépôt très mince, de texture variée et au drainage de xérique à hydrique
MS21	Sapinière à bouleau blanc sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique
MS22	Sapinière à bouleau blanc sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique
MS25	Sapinière à bouleau blanc sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique
MS2B	Sapinière à bouleau blanc sur dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage subhydrique avec seepage
RE11	Pessière noire à lichens sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique
RE20	Pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt très mince, de texture variée et au drainage de xérique à hydrique
RE21	Pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique
RE22	Pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique
RE24	Pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage subhydrique
RE25	Pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique
RE2A	Pessière noire à mousses ou à éricacées sur dépôt de mince à épais, en mi-pente, de texture moyenne et de drainage mésique
RE37	Pessière noire à sphaignes sur dépôt minéral de mince à épais, de drainage hydrique, ombrotrophe
RE38	Pessière noire à sphaignes sur dépôt organique ou dépôt minéral de mince à épais, de drainage hydrique, minérotrophe
RE39	Pessière noire à sphaignes sur dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe
RS20	Sapinière à épinette noire sur dépôt très mince, de texture variée et au drainage de xérique à hydrique
RS21	Sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique ou mésique
RS22	Sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique
RS24	Sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage subhydrique
RS25	Sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique
RS2A	Sapinière à épinette noire sur dépôt de mince à épais, en mi-pente, de texture moyenne et de drainage mésique
RS38	Sapinière à épinette noire et sphaignes sur dépôt organique ou dépôt minéral de mince à épais, de drainage hydrique, minérotrophe

— Type écologique de drainage subhydrique (4-5-6) ou hydrique (7-8-9)

Figure 20. Importance relative des ornières selon les types écologiques (SIGOUIN 2002).

B. Les dépôts mésiques de texture moyenne (c'est-à-dire le till mésique, milieu physique 2) se sont vus attribuer une faible vulnérabilité à l'orniérage lors de l'analyse des types de milieux physiques (Figures 5 et 6). La section sur les types écologiques (Figure 10), ainsi que les résultats de SIGOUIN (2002, Figure 20), ont cependant démontré que des différences afférentes à l'orniérage existaient entre les végétations potentielles. Par exemple, la vulnérabilité de MS22 est faible, comparée à une vulnérabilité moyenne pour RS22 et RE22. On comprend que ces différences entre le comportement des types écologiques sont surtout liées à la pente. Afin de tenir compte de ces éléments dans la grille de la figure 19, les pentes A, B et C ont été dissociées des pentes D et E.

C. Les dépôts subhydriques de texture moyenne (till subhydrique, milieu physique 5) ont été traités selon la même logique que le till mésique, c'est-à-dire que des précisions ont été apportées en fonction de la pente. Une vulnérabilité moyenne est associée aux pentes B, C, D qui caractérisent principalement le type écologique RS25 (Figure 10B). Une vulnérabilité moyenne-élevée a été attribuée aux pentes A, représentatives du type écologique RE25 (Figure 10B).

D. Les sables subhydriques (milieu physique 4) ont reçu une cote « élevée » lors de l'analyse des types de milieu physique (Figures 5 et 6). Comme ces milieux ont été peu échantillonnés et que notre expérience de terrain laisse croire que ces sites sont surévalués, la cote a été diminuée à « moyenne-élevée ». Les données de SIGOUIN (2002) nous étonnent et montrent également des superficies avec une forte densité d'ornières sur les sables subhydriques (RS24, RE24, Figure 20). La lecture du graphique de SIGOUIN (2002) suggère même que les sables subhydriques auraient pu être classés avec RE37 (vulnérabilité élevée à très élevée). Nous en concluons que ce type de milieu physique devra être mieux étudié avant d'établir de bonnes relations avec la vulnérabilité à l'orniérage. Par ailleurs, les superficies couvertes par ces sables subhydriques nous ont toujours semblé relativement rares. La plupart des géocodes visités et identifiés au sable subhydrique sur les cartes écoforestières correspondent généralement au sable xérique-mésique.

E. Les sols hydriques minéraux (milieu physique 7) ont été classés selon une vulnérabilité « élevée » dans les analyses précédentes (Figures 5 et 6). Si l'on suivait le même cheminement que pour le milieu physique 5, défini plus haut (point C), la cote « moyenne-élevée » leur serait attribuée. Par ailleurs, les résultats de SIGOUIN (2002, Figure 20) ainsi que notre expérience de terrain nous incitent à positionner les milieux physiques 7 dans les vulnérabilités élevées. Par ailleurs, nous posons l'hypothèse que le comportement des sols hydriques minéraux de texture moyenne ou grossière devrait être différent des sols de texture fine. Une vulnérabilité élevée à l'orniérage est attribuée à la première entité, en comparaison d'une vulnérabilité très élevée pour la seconde (Figure 19).

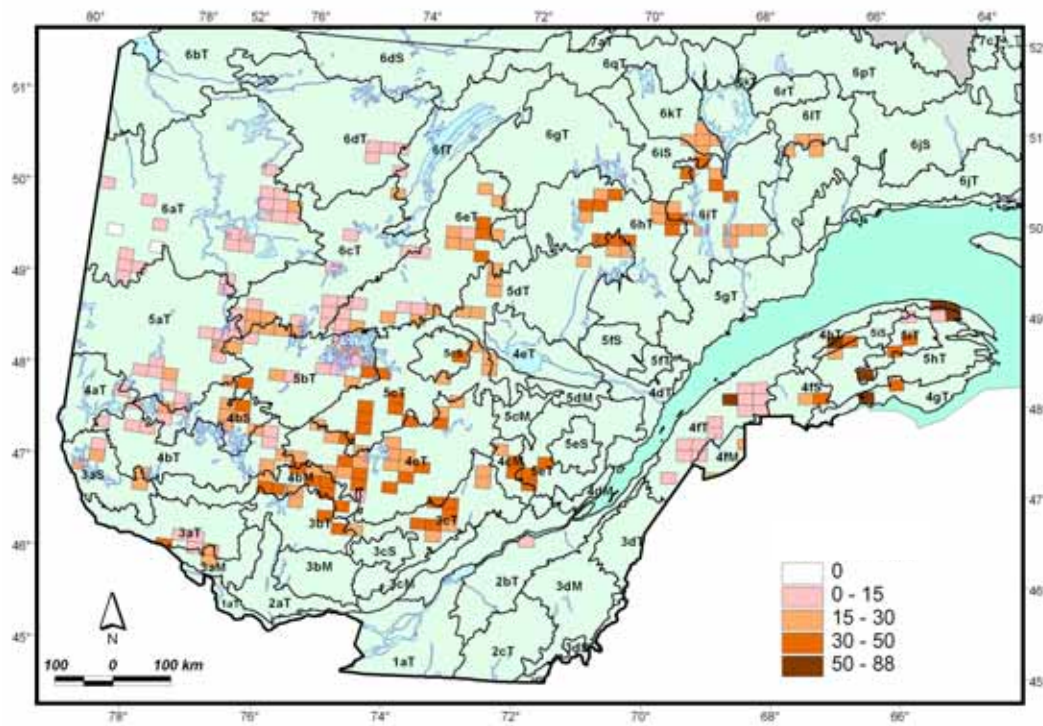
F. Les sols hydriques minérotrophes (milieu physique 8) sont analysés d'une façon apparentée aux sols hydriques minéraux (milieu physique 7). Une vulnérabilité élevée est accordée aux dépôts de texture moyenne ou grossière, en comparaison d'une vulnérabilité très élevée pour les sols de texture fine.

G. Les sols très minces (milieu physique 0) sont reconnus comme des sites propices aux ornières éparses. Ainsi, une vulnérabilité moyenne leur est attribuée (Figures 5 et 6). L'analyse sur les types écologiques dissocie toutefois les sols très minces selon la végétation potentielle. RE20 (pessière noire sur sol très mince) se voit accorder une vulnérabilité élevée (Figure 10) et RS20 (sapinière à épinette noire sur sol très mince) une vulnérabilité moyenne. Les résultats de SIGOUIN (2002) appuient cette

classification. On comprend que les différences obtenues entre RE20 et RS20 sont liées à la pente (Figure 10B). RE20 est généralement observé sur des pentes plus faibles que RS20. Plus précisément, RE20 préfère la classe de pente B et RS20 la classe C (Figure 10B). Ces éléments structurent la clé de la figure 19 en regard de MP0. Par ailleurs, plusieurs éléments de cette étude suggèrent que les pentes F pourront être l'objet d'ornières abondantes (Figures 8B1, 16B).

Les figures 21 et 22 présentent les résultats obtenus après avoir appliqué la grille de vulnérabilité aux territoires récemment coupés. Ces résultats sont conformes à la répartition québécoise des types de milieux physiques et au degré de vulnérabilité à l'orniérage qui leur a été attribuée. L'Abitibi, et en particulier la partie de son territoire qui correspond à la région administrative 08, est la région la plus à risque. De nombreuses superficies se voient attribuer une vulnérabilité élevée à l'orniérage. La vulnérabilité diminue par la suite de l'ouest du Québec, vers l'est. La Gaspésie demeure la région la moins vulnérable.

A. Feuilletés au 1 : 20 000



B. Aires communes

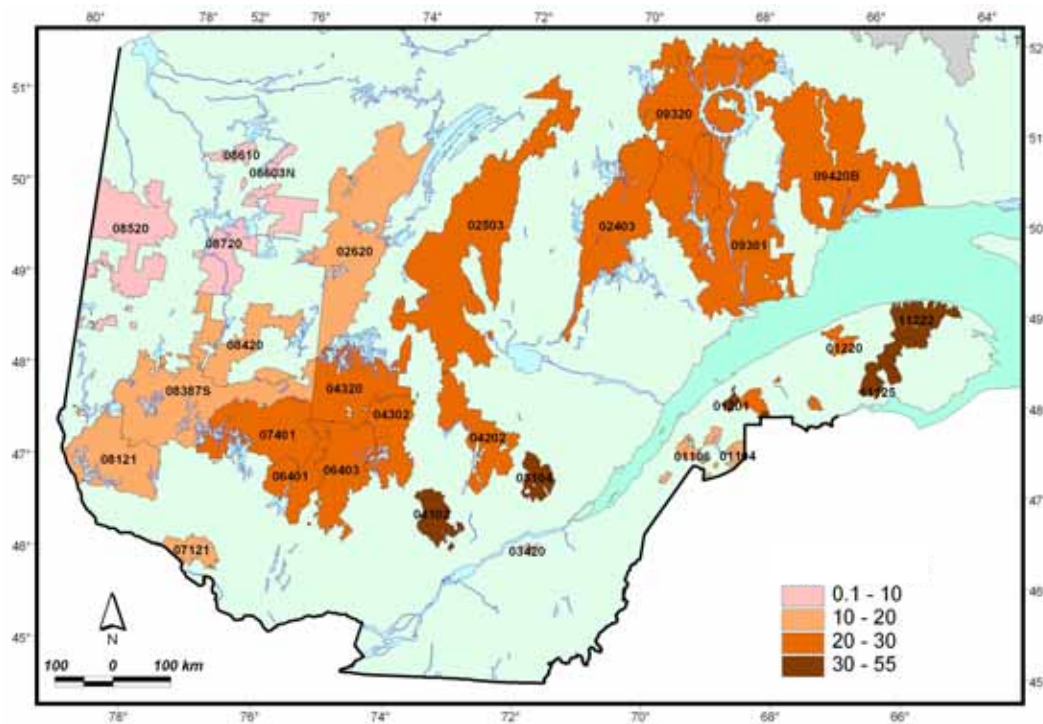


Figure 21. Importance relative des territoires dotés d'une faible vulnérabilité à l'orniérage.

54

Conclusion

Cette étude se situe dans la même lignée que celle de SIGOUIN (2002). Elle vise essentiellement à utiliser le potentiel des données écologiques figurant sur les cartes écoforestières du MRNF, ceci dans le but de parfaire l'aménagement forestier, notamment en permettant d'évaluer le niveau de vulnérabilité des sols à l'orniérage. Afin d'atteindre le but fixé, nous avons analysé des données d'orniérage d'un territoire de 122 km². La démarche utilisée a conduit à estimer la vulnérabilité à l'orniérage de trois entités : les types de milieux physiques, les types écologiques et un ensemble de variables forestières. À l'appui des résultats obtenus et de ceux présentés par SIGOUIN (2002), nous avons élaboré une grille d'évaluation de la vulnérabilité à l'orniérage. Cette grille est surtout stratifiée en fonction du type de milieu physique et de la classe de pente. Quatre classes de vulnérabilité à l'orniérage ont été retenues au départ : faible, moyenne, élevée et très élevée. La classe moyenne à élevée a été ajoutée à la suite de l'analyse des résultats.

À partir de cette grille, la Direction de l'environnement forestier (DEF) du MRNF pourra concevoir une méthode simple et économique d'évaluation du degré de vulnérabilité à l'orniérage pour chacune des unités d'aménagement forestier. Il s'agira par la suite de fixer des cibles d'amélioration qui varieront selon le degré de vulnérabilité du territoire à l'orniérage (SCHREIBER, en prép.). Afin de respecter la cible fixée, les bénéficiaires pourront se servir d'une grille similaire à celle présentée dans cette étude et l'appliquer à leur territoire. Ainsi, en ayant une bonne connaissance de la répartition des territoires les plus vulnérables à l'orniérage, les bénéficiaires seront en mesure d'élaborer des stratégies d'aménagement plus appropriées à ce phénomène.

Par une approche d'amélioration continue, le MRNF vise au cours des prochaines années à améliorer la grille d'évaluation développée dans cette étude. À cette fin, la donnée écologique sera davantage prise en compte lors des travaux de suivi de l'orniérage. Certains paramètres destinés à mieux connaître les relations entre la donnée écologique et l'orniérage seraient évalués au cours des suivis réguliers et pourraient être consignés à l'exemple du type de milieu physique, du type écologique et la période de la coupe (automne, hiver...). Une quantité plus importante de données sera ainsi accumulée à peu de frais

sur plusieurs années et pourra être analysée selon une méthode apparentée à celle présentée dans le présent document. De cette façon, une analyse plus fine de la sensibilité du territoire pourrait être effectuée et des améliorations pourraient être apportées à la clé de vulnérabilité à l'orniérage. Cela permettrait, entre autres, une meilleure planification des opérations forestières.

Références bibliographiques

- BLOUIN, J. et J.-P. BERGER, 2000. *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 5b – Coteaux du réservoir Gouin, 5c – Collines du Haut-Saint-Maurice et 5d – Collines qui ceignent le lac Saint-Jean*. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers.
- LEGENDRE, P., 2001. Program K-means disponible sur le site Internet de l'auteur à l'Université de Montréal. <http://www.bio.umontreal.ca/legendre/>
- LEGENDRE, P. et L. LEGENDRE, 1998. *Numerical Ecology, 2nd English edition*. Elsevier Science BV, Amsterdam. 853 p.
- MRN, 2001. *Le système hiérarchique de classification écologique du territoire*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles.
<http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-systeme.jsp>
- MRNF, 2005. Objectifs de protection et de mise en valeur des ressources du milieu forestier, plans généraux d'aménagement forestier 2007-2012 : document de mise en œuvre. Gouvernement du Québec. 47 p. www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/consultation/consultation-objectifs.jsp
- SAUCIER, J.-P., J.-P. BERGER, H. D'AVIGNON et P. RACINE, 1994. *Le point d'observation écologique*. Ministère des Ressources naturelles du Québec. 116 p.
- SCHREIBER, A., H. L'ÉCUYER, R. LANGEVIN et N. LAFONTAINE, (en préparation). *Objectifs de protection et de mise en valeur du milieu forestier : lignes directrices pour la mise en œuvre des objectifs de conservation des sols et de l'eau*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement forestier.

- SCHREIBER, A., J.-P. JETTÉ et I. AUGER, 2002. *L'orniérage dans les CPRS et dans les autres coupes de régénération*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de l'environnement forestier. 37 p.
<http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/2002-3085.pdf>
- SIGOUIN, M.-E., 2002. *Méthode de classification des sites vulnérables à l'orniérage*. Faculté de foresterie et de géomatique (mémoire de fin d'étude). 36 p.
- TER BRAAK, C.J.F. et P. SMILAUER, 2002. *CANOCO reference manual and canodraw for window user's guide : software for canonical community ordination (version 4.5)*. Microcomputer Power (Ithaca, NY, USA). 500 p.



Le mandat de la Direction de la recherche forestière (DRF) au sein du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs est de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec en réalisant des travaux principalement à long terme et d'envergure provinciale qui intègrent à la fois des préoccupations de recherche fondamentale et de recherche appliquée.

Elle subventionne aussi des recherches universitaires à court et à moyen terme; ces recherches, importantes pour le MRNFP, sont complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne peut s'impliquer.